

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DAYANNE SEVERIANO MENEGUETE

**ESTABILIZAÇÃO “FÍSICO-QUÍMICO” DE RESÍDUO SULFETADO/SULFATADO
COM INCORPORAÇÃO DE ESCÓRIA DE DESSULFURAÇÃO**

VITÓRIA-ES

2018

DAYANNE SEVERIANO MENEGUETE

**ESTABILIZAÇÃO “FÍSICO-QUÍMICO” DE RESÍDUO SULFETADO/SULFATADO
COM INCORPORAÇÃO DE ESCÓRIA DE DESSULFURAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração em Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires

VITÓRIA-ES

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)
Sandra Mara Borges Campos – CRB-6 ES-000593/O

M541e Meneguete, Dayanne Severiano, 1988-
Estabilização "físico-químico" de resíduo sulfetado/sulfatado
com incorporação de escória de dessulfuração / Dayanne
Severiano Meneguete. – 2018.
98 f. : il.

Orientador: Patrício José Moreira Pires.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Resíduos sólidos. 2. Escória. 3. Dessulfuração. 4. Sulfetos.
5. Sulfatos. 6. Pavimentos. I. Pires, Patrício José Moreira. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.
Título.

CDU: 621

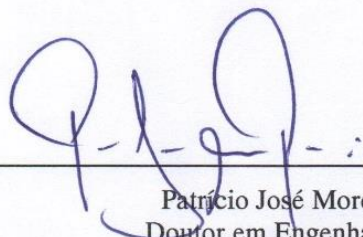
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

**ESTABILIZAÇÃO “FÍSICO-QUÍMICO” DE RESÍDUO
SULFETADO/SULFATADO COM INCORPORAÇÃO DE ESCÓRIA DE
DESSULFURAÇÃO**

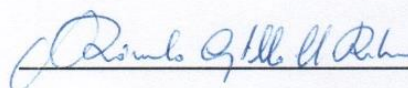
Dayanne Severiano Meneguete

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.

Aprovada no dia **03 de janeiro de 2018** por:



Patrício José Moreira Pires
Doutor em Engenharia Civil
Orientador - UFES



Rômulo Castello Henriques Ribeiro
Doutor em Engenharia Civil
Examinador Interno - UFES



Sérvio Túlio Alves Cassini
Doutor em Microbiologia Ambiental
Examinador Externo - UFES

Vitória – ES, janeiro de 2018

Dedico este trabalho a meu Pai Adão
Meneguete, que lá do Céu intercede em
minhas conquistas. Saudades Eternas!

AGRADECIMENTOS

A Deus que sempre me guiou para que pudesse atingir meus objetivos, me dando saúde, força, fé e determinação durante todos esses anos de estudo.

Em especial ao meu Pai Adão Meneguete que eu tenho certeza que mesmo não estando aqui presente está muito feliz com mais essa conquista. A minha mãe que sempre me incentivou a buscar meus sonhos, nunca medindo esforços para cuidar de mim. A minha irmã, parceira de todas as horas que sempre me apoiou. A todos os meus familiares, avós, tios e primos que sempre me incentivaram, principalmente a Isabella que sempre ajudou nas traduções.

Ao Naycou, meu amigo, noivo e futuro esposo, sempre ao meu lado com muito companheirismo e muito amor.

Ao meu orientador Professor Patrício José Moreira Pires, que nunca mediu esforços para me apoiar, dando sempre aquele puxão de orelha quando necessário. Professor você contribuiu muito para o meu desenvolvimento durante esses últimos anos, muito obrigada.

As minhas parceiras de viagem, Mirella e Simone, que durante todo esse período dividiram o sentimento de cansaço e de perseverança para continuar.

A equipe da Faculdade do Sul Bahia pela oportunidade, amizade e compreensão.

A todos os Mestres, que durante esse processo me ensinaram e incentivaram de alguma maneira.

Aos amigos do Mestrado, que durante esses anos sempre me ajudaram e deram força para continuar lutando, e sempre, ajudaram a fazer uma aquela “leitura”. Em especial aos Técnicos e Monitores do Laboratório da UFES, Sidineidy, Natália, Lucas e Hully que sempre auxiliaram na execução dos ensaios. Ao Filipe, que ajudou nos agendamentos. Os técnicos da ECO 101, que nessa reta final deram aquela força.

Enfim, a todos que de alguma forma me ajudaram a atingir mais essa conquista, meu muito obrigada.

"Julgue seu sucesso pelas coisas que você teve que renunciar para conseguir".

Dalai Lama

MENEGUETE, Dayanne Severiano. **Estabilização “Físico-Químico” de Resíduo Sulfetado/Sulfatado com Incorporação de Escória de Dessulfuração**. 2018. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

RESUMO

Os processos de mineração e siderurgia são alguns dos responsáveis pela movimentação da economia do país, em contrapartida estas ações são as responsáveis pela produção de um grande volume de resíduos sólidos. Associado a esses processos, tem-se a utilização de novas práticas voltadas para a gestão e reutilização destes materiais. Assim, o objetivo desta pesquisa é analisar o comportamento físico-químico do resíduo (estéril) proveniente de uma mineradora de ouro, quando incorporado a escória de dessulfuração, analisando parâmetros como a melhora das propriedades mecânicas da mistura como a capacidade de suporte, as concentrações de sulfeto/sulfato finais e permeabilidade. No processo de preparação das amostras foi utilizada a escória de dessulfuração em concentrações 20%, 30% e 40% com relação ao Resíduo de Mineração. Os melhores resultados foram para os com 40% de concentração de escória de dessulfuração que permitiram um ganho de 1450% na capacidade de suporte, visto que o Índice de Suporte Califórnia do Resíduo de Mineração foi de 1,68% após 96 horas de ensaio e a amostra com 40% de escória de Dessulfuração apresentou um ISC de 24,37% após 96 horas e um ISC de 63,93% ao final de 28 dias. Essa mistura também proporcionou uma redução nos índices de plasticidade e permeabilidade do material, tornado aplicável para pavimentação em estradas vicinais. Além disso ao se analisar as concentrações de sulfeto/sulfato das soluções coletadas através do ensaio de Coluna, pode-se verificar que os extratos solubilizados das amostras 1, 3, 4 e 5, apresentam concentrações de 9180 mg/L, 1918 mg/L, 2560 mg/L e 3143 mg/L de Sulfato, respectivamente, que são superiores aos 250 mg/L de Sulfato, exigidos na NBR 10.004:2004, o que permite classificar o resíduo e as misturas, segundo esta norma como um Resíduo Não Perigoso e Não Inerte - Classe II A, com base nas concentrações de Sulfeto/Sulfato. Logo, após as análises do comportamento físico-químico, constata-se a viabilização sustentável entre a incorporação dos dois resíduos e sua aplicação em estradas vicinais.

Palavras-chave: resíduos sólidos, escória de dessulfuração, sulfeto/sulfato, pavimentação.

MENEGUETE, Dayanne Severiano. **“Physical-chemical” Stabilization of Sulfetated/Sulfated Residue with Incorporation of Dessulfuration Slag**. 2018. 98f. Dissertation (Master's Degree in Civil Engineering), Program in Civil Engineering, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

ABSTRACT

The process of mining and steel industry are accountable for the movement of millions in the country's economy, on the other hand these actions responsible for the production of a large volume of solid waste. Associated with these processes, there are new practices geared towards management and reuse of these materials. Therefore, the purpose of this research is to assess the physical-chemical behavior of the residue (sterile) coming from a gold mining company when combined with dessulfuration slag, analyzing parameters such as the improvement of the mechanic characteristics of the mixture, capacity of support, the final concentrations of sulfeto/sulfate and permeability. In the preparation process of the samples were used dessulfuration slag in concentrations of 20%, 30% and 40% regarding the mining residue. The best results were attained with 40% of concentration of desulphurisation dreg that allowed 1450% gain in the capacity of support, since the ISC (Índice Suporte Califórnia) of the mining residue was 1,68% after 96 hours of trial and the sample with 40% of dessulfuration slag provided a ISC of 24,37% after 96 hours and a ISC of 63,93% after 28 days. This mixture also provided a reduction in the plasticity and permeability indices of the material, being applicable for paving on back roads. Besides that, when analyzing the sulfeto/sulfate concentrations of the samples collected by the Coluna trial, was verified that the solubilized extracts of samples 1,3, 4 and 5 show concentrations of 9180 mg/L, 1918 mg/L, 2560 mg/L and 3143 mg/L of sulphate, respectively, that are above 250mg/L of Sulfate required in NBR 10.004:2004, which allows to classify the residue and mixtures, according to this standard as a Residue No Hazardous and Non-Inert - Class II A, based on Sulfide / Sulphate concentrations. Thereore, after the analysis of the physical-chemical behavior, the sustainable viability of the incorporation of the two wastes and its application in back roads is verified.

Keywords: solid waste, dessulfurization slag, sulphide/sulphate contamination, paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –Esquema da Produção do Aço.....	30
Figura 2 - Etapas do Processo Siderúrgico.....	31
Figura 3 - Métodos Industriais de Dessulfuração do Gusa Líquido na Panela.....	32
Figura 4 - Seção de Sondagem 07N – Vista para o Norte	45
Figura 5 - Sequência da Realização dos Ensaios	48
Figura 6 - Procedimento - Ensaio de Massa Específica.....	49
Figura 7 - Ensaio de Peneiramento – Resíduo.....	51
Figura 8 – Ensaio de Peneiramento – Escória de Dessulfuração	52
Figura 9 - Ensaio de Limite de Liquidez – Resíduo	53
Figura 10 - Procedimentos - Limite de Plasticidade	53
Figura 11 - Equipamento - Compressão Axial.....	55
Figura 12 - Equipamento - Permeâmetro de Parede Flexível	56
Figura 13 - Procedimento - Permeâmetro de Parede Flexível	57
Figura 14 - Amostras - Ensaio de Índice Suporte Califórnia.....	58
Figura 15 - Extração do Lixiviado e Solubilizado.....	62
Figura 16 – Procedimento – Concentração de Sulfeto – Precipitado.....	63
Figura 17 - Ensaio – Determinação da Concentração de Sulfeto.....	64
Figura 18 - Resultado - Compressão Axial 28 Dias.....	73
Figura 19 - Caracterização e Classificação de Resíduos Conforme NBR 10.004:2004	87

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva Padrão da Concentração de Sulfato	65
Gráfico 2 - Curvas ISC – Ensaios Preliminares	66
Gráfico 3 - Resultados – Curva Granulométrica.....	69
Gráfico 4 - Curvas de Compactação	71
Gráfico 5 – Resultados - Resistência à Compressão Axial	72
Gráfico 6 - Comparativo Permeabilidade	75
Gráfico 7 - Curvas ISC	76
Gráfico 8 - Resumo Resultados - ISC	77
Gráfico 9 – Resultados – Expansão no ISC	78
Gráfico 10 - Resultados – PTM-130 - Resíduo de Mineração	79
Gráfico 11 - Resultados – PTM-130 – Coproduto Siderúrgico	80
Gráfico 12 - DRX – Amostra 1 – Resíduo de Mineração.....	83
Gráfico 13 - DRX 2 – Amostra 2 – Escória KR	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Exemplo de Minerais Sulfetados	26
Quadro 2 – Exemplo de Minerais Sulfatos	27
Quadro 3 - Possíveis Alterações nas Propriedades do Solo a partir da Adição de Cal	35
Quadro 4 - Resultados de Expansão para Solos não Tratados e Estabilizados com Composto a Base de Cálcio	39
Quadro 5 - Descrição das Misturas	44
Quadro 6 – Composição Química da Escória de Dessulfuração.....	46
Quadro 7 - Detalhes da Coleção de Amostras/Dados.....	60
Quadro 8 – Dados da Curva Padrão de Sulfato da Concentração de Sulfato.....	65
Quadro 9 –Composição das Amostras – Ensaio de Compressão Axial.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados ISC - Ensaios Preliminares.....	67
Tabela 2 - Resultados - Massa Específica	67
Tabela 3 - Resultados - Limites de Consistência	70
Tabela 4 - Classificação das Amostras	70
Tabela 5 - Permeabilidade - Dados dos Corpos de Prova	74
Tabela 6 - Comparativo de Resultados x DNIT	77
Tabela 7 - Análise Química Básica	81
Tabela 8 - Resultados da Análise Química Semiquantitativa - FRX.....	82
Tabela 9 - Análise Química - Material do Ensaio de Coluna - Concentração de S^{2-} e SO_4^{2-}	85
Tabela 10 - pH das Amostras – Ensaio de Coluna.....	85
Tabela 11 - Lixiviado e Solubilizado - Concentração de Sulfeto e Sulfato	86

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACOBASIL – Instituto Aço Brasil

CBR – *California Bearing Ratio*

CCABrasil – Centro de Coprodutos Aço Brasil

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CTC – Capacidade de Troca de Cátions

DRX – Difração de Raios X

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura dos Transportes

ES – Espírito Santo

FRX – Fluorescência Induzida por Raios X

HBR – *Highway Research Board*

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

ISC – Índice de Suporte Califórnia

IP – Índice de Plasticidade

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

KR – Reator Kanbara

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

NBR – Norma Brasileira

NLA – *National Lime Association*

NL – Não Líquido

NP - Não Plástico

PTM – *Pennsylvania Testing Method*

SC – Solo Cimento

SMC – Solo Melhorado com Cimento

SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos

Al – Alumínio.

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio.

BaCl_2 – Cloreto de Bário.

BaSO_4 - Sulfato de Bário.

C – Carbono.

Ca^{2+} – Cátion de Cálcio.

CaO – Óxido de Cálcio.

CaSO_4 – Sulfato de cálcio – Anidrita.

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – Sulfato de cálcio hidratado – Gipsita.

$\text{Ca}_6\text{Al}_2\text{OH}_{12} (\text{SO}_4)_3 + 26\text{H}_2\text{O}$ – Etringita.

CO_3^{2-} – Carbonato.

CuFeS_2 - Bisulfeto de cobre e ferro – Calcopirita.

FeO – Óxido de Ferro.

FeS - Sulfeto de ferro – Pirrotita.

FeS_2 - Disulfeto de ferro – Pirita.

Fe_2O_3 – Óxido de Férnico.

H – Hidrogênio.

H_2S – Sulfeto de Hidrogênio.

K – Potássio.

K_2O – Óxido de Potássio.

Mg – Magnésio.

MgO - Óxido de Magnésio.

MnO – Óxido de Manganês.

O_2 – Oxigênio.

S – Enxofre.

S^{2-} – Sulfeto

SO_3^{2-} – Sulfito.

SO_4^{2-} – Sulfato.

SiO_2 – Dióxido de Silício – Quartzo.

SrO – Óxido de Estrôncio.

TiO_2 – Dióxido de Titânio.

ZnO – Óxido de Zinco.

ZrO_2 - Óxido de Zircônio.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVO	21
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	SOLOS SULFETADOS/SULFATADOS	24
2.2	COPRODUTOS SIDERÚRGICOS DE DESSULFURAÇÃO	28
2.3	ESTABILIZAÇÃO E MELHORAMENTO DE SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO 33	
2.3.1	Estabilização e Melhoramento de Solo Sulfetado/Sulfatado	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS	42
3.1.1	Ensaio Preliminares	42
3.1.2	Coleta das Amostras e Tipos de Resíduos	43
3.1.3	Caracterização Geotécnica e Físico-químico	47
3.2	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS E MECÂNICAS	48
3.2.1	Caracterização Geotécnica	48
3.2.2	Compactação	54
3.2.3	Compressão Axial	54
3.2.4	Permeabilidade	56
3.3	AVALIAÇÃO DOS ADITIVOS NA CAPACIDADE DE SUPORTE	57
3.4	AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICO	59
3.4.1	Difração de Raio-X	59
3.4.2	Espectrometria de Fluorescência de Raios-X	60
3.4.3	Ensaio de Coluna	61
3.4.4	Ensaio de Lixiviação e Solubilização	62
3.5	AVALIAÇÃO DA NBR 10.004:2004	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1	ENSAIOS PRELIMINARES	66
4.2	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS E MECÂNICAS	67
4.2.1	Caracterização Geotécnica	67
4.2.2	Compactação	71

4.2.3	Compressão Axial	72
4.2.4	Permeabilidade	74
4.3	AVALIAÇÃO DOS ADITIVOS NA CAPACIDADE DE SUPORTE	76
4.3.1	Expansão	78
4.4	AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICO.....	80
4.4.1	Ensaio de Coluna	84
4.4.2	Ensaio de Lixiviação e Solubilização	86
4.5	AVALIAÇÃO DA NBR 10.004:2004.....	87
5	CONCLUSÕES.....	89
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
	REFERÊNCIAS.....	92

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade é uma terminologia que vem ganhado destaque em todas as áreas, principalmente na Engenharia Civil, de forma que fazer a utilização racional de materiais, trabalhar com seu reaproveitamento e utilizar ferramentas apropriadas são atitudes incorporadas à rotina de muitas empresas.

Empresas como indústrias de mineração e siderurgia são as responsáveis pela movimentação de milhões na economia do país. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM, (2016), devido à grande variedade e quantidade de jazidas em sua extensão territorial, a indústria de mineração brasileira atingiu os US\$ 40 bilhões em produção, o que representou 5% do PIB industrial do país. No setor siderúrgico o Brasil encontra-se no patamar de 11º na exportação mundial de aço, o que segundo o Instituto Aço Brasil – ACOBRASIL, (2015), contribui a um saldo comercial de US\$ 3,9 bilhões.

Em contrapartida a toda essa produção e crescimento econômico, estes setores são responsáveis pela produção de um grande volume de resíduos sólidos, por exemplo, a indústria siderúrgica gera por tonelada de aço produzido 700 quilos de resíduos sólidos, estimativa essa feita pela Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM em 2008.

No caso da mineração, se tem um processo altamente impactante para as condições naturais no planeta, por esse procedimento envolver a extração de recursos naturais não renováveis, mas necessários para a manufatura de vários produtos. Logo, associado a exploração mineral tem-se a produção dos resíduos sólidos, que aumentam na mesma escala que o processo de extração.

O tratamento destas áreas degradadas é um fator preocupante que levou o Ministério do Meio Ambiente criar em 2001, o Manual de Normas e Procedimentos para Licenciamento Ambiental no Setor de Extração Mineral, que contém uma série de técnicas e processos que devem ser aplicados para a reabilitação das áreas degradadas, com o intuito de proporcionar o equilíbrio ambiental e o retorno do ecossistema natural.

Isto posto, fica evidente de que além de uma destinação ideal, esses resíduos necessariamente precisam ser reaproveitados de alguma forma. Nesse aspecto,

surtem vários estudos voltados para a aplicação dos resíduos siderúrgicos na construção civil, um exemplo é a aplicação desse material como agregado para o melhoramento e estabilização do solo para aplicação em base e sub-base na pavimentação.

Sabe-se que a construção de rodovias é um processo oneroso, seja no que tange a concepção do projeto, execução e posteriormente em sua manutenção. Como o solo é a base desta estrutura, que vai receber o pavimento flexível e os carregamentos externos, uma vez bem compactado, aplicado e estabilizado garante a resistência necessária ao pavimento para suportar as cargas então aplicadas.

Assim sendo, para a construção de estradas é necessário a utilização de um solo apropriado, que muitas vezes necessita de aditivos para garantir um bom desempenho. Nesse âmbito, de acordo com Azevedo e Ramalho (2000 *apud* CORRÊA 2008) os materiais utilizados na base e/ou sub-base de pavimentos rodoviários devem apresentar certas propriedades físicas e químicas para que sejam capazes de conferir estabilidade e resistência mecânica aos esforços e cargas, e assim, resistirem durante toda a vida útil da estrada.

Portanto, para realizar a perfeita estabilização do solo, é necessário a utilização de métodos que trabalhem as características físicas, químicas e mecânicas do solo em conjunto. Marques (2006), em seu estudo apresenta alguns métodos de estabilização do solo, que podem ser, estabilização solo-cimento, estabilização solo-cal, estabilização solo-betume e estabilização granulométrica.

Com esses processos de estabilização do solo, para fins de pavimentação, espera-se obter uma melhoria na resistência, que dará maior capacidade de suporte ao solo e o tornará menos sensível às variações ambientais. Corrêa (2008) elenca outras propriedades do solo que podem ser alteradas e melhoradas para sua utilização em rodovias, como a permeabilidade, a compressibilidade, e por fim, a estabilidade volumétrica.

Dessa forma, surge a temática desta pesquisa. Verificar o comportamento do resíduo proveniente da extração do ouro no processo de mineração, afim de reaproveitá-lo no processo de pavimentação para áreas dentro da própria mineradora. Porém, no caso deste resíduo, estima-se que ele apresente valores relevantes de expansão, isso porque, devido sua formação, estes materiais podem possuir minerais da família da

Ilita e Montmorilonita por exemplo, que de acordo com, Zhang, (2015, p. 199), são minerais expansíveis.

Além do mais, por ser tratar de um resíduo extraído de uma mina de ouro, existe a possibilidade de que esse material apresente altas concentrações de elementos como sulfetos e sulfatos em sua composição etc. Esses elementos devem ter suas concentrações reguladas segundo a NBR 10.004:2004 –Resíduos Sólidos – Classificação, para não caracterizar materiais nocivos.

Diante destas particularidades, existe o questionamento quanto existência de uma técnica de estabilização ambientalmente viável que proporcione a estabilização física e mecânica do resíduo proveniente de uma mineradora de ouro, sem impactar suas propriedades químicas, proporcionando assim uma solução sustentável para o reaproveitamento deste material. E é com base nesse questionamento são definidos os objetivos gerais e específicos desta pesquisa.

1.1 OBJETIVO

O objetivo dessa dissertação é caracterizar o material proveniente da mineração de ouro e verificar seu comportamento físico/químico quando incorporado a aditivos para melhoramento do solo, a fim de obter uma mistura estabilizada, e, conseqüentemente de viabilidade sustentável, proporcionando sua aplicação na pavimentação de uma estrada vicinal.

De forma que para atingir tais objetivos essa dissertação seguiu com objetivos específicos:

- Caracterizar geotecnicamente o resíduo da mineração de ouro;
- Verificar a influência de aditivos na capacidade de suporte no Resíduo de Mineração, através de ensaios preliminares;
- Analisar as propriedades mecânicas das misturas entre os resíduos (Resíduo da Mineração de Ouro e a Escória de Dessulfuração) como componentes de pavimentação para aplicação em uma estrada vicinal;
- Avaliar a incorporação físico-químico dos resíduos em estudo, para posteriormente classificar os materiais conforme NBR 10.004:2004 para as concentrações de sulfeto/sulfato.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para a melhor apresentação e desenvolvimento do tema proposto, a presente pesquisa está estruturada em cinco capítulos, cujo conteúdo aborda diversos aspectos relevantes sobre a pesquisa que será explanada.

No Capítulo inicial tem uma breve apresentação sobre o tema com justificativas, problemas, os principais objetivos e a estrutura de apresentação. A partir do segundo capítulo inicia-se a abordagem precisa do conteúdo programático com o estudo sobre os solos com presença de sulfeto/sulfato, coprodutos siderúrgicos e técnicas para estabilização e melhoramento de solos com presença de sulfetos/sulfatos.

O Capítulo três apresenta os materiais e métodos utilizados na pesquisa no qual se enquadram os principais ensaios, a delimitação do escopo, e o processo de pesquisa. No capítulo subsequente, têm-se os resultados obtidos e suas análises, principalmente no que se refere à incorporação físico-químico dos materiais.

Por fim, como último tópico textual, tem-se a conclusão da pesquisa de acordo com os objetivos propostos. E o capítulo seis, apresenta todas as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Com o acelerado e desordenado crescimento das cidades, a Engenharia Civil se depara cada vez mais com problemas geotécnicos impostos pelo subsolo. Assim, a necessidade de se construir em locais antes considerados impróprios é mais frequente, tornando o espaço um item básico em seus processos. Dessa forma, a composição do solo em que se localizará a obra interfere diretamente nos métodos construtivos a serem adotados e, até mesmo, na viabilidade do projeto.

Um outro fator importante nos dias atuais está ligado a alta produção de resíduos sólidos, o que acaba gerando um novo desafio para a engenharia, que deve tratar e reutilizar esses materiais de alguma forma. Como a Engenharia Civil é a responsável pelas construções civis, cabe a ela desenvolver novos métodos para tornar possível a construção nestes locais ditos inapropriados e a utilização destes materiais que até o momento eram simplesmente descartados.

A partir do estudo do solo e de posse às novas tecnologias, torna-se possível, do ponto de vista técnico e econômico, aproveitar áreas ditas inadequadas pela construção civil, possibilitando construções. Dentre estas tecnologias utilizadas, pode-se citar o uso de aditivos como solo-cimento e solo-cal, como compostos que atuam como um elemento estabilizante para solos, melhorando assim sua capacidade de suporte ou reduzindo características com a expansão ou contração do solo.

O uso desses aditivos com solo é muito frequente para a concepção de base para pavimento rodoviário, e muitas vezes, visa viabilizar a aplicação do próprio material da região, o que possibilita a eliminação de bota-fora e uma grande economia, por não ter que transportar material de outras regiões.

Com este intuito, o presente capítulo visa entender qual o comportamento de solos ditos resíduos de algum processo, que apresentam em sua composição concentrações sulfeto/sulfato, e, quais as técnicas possíveis para estabilização de solos que podem ser aplicadas a estes resíduos de forma que estes possam ser utilizados como materiais para estradas não pavimentadas na própria região de onde foram extraídos.

Além disto, serão apresentados os fundamentos teóricos pertinentes a linha de pesquisa escolhida. Dessa forma, o estudo sobre temas como solos

sulfetados/sulfatados, coproduto siderúrgicos e técnicas para estabilização e melhoramento de solos com presença de sulfeto/sulfato, serão contemplados no decorrer deste capítulo, com o intuito de fundamentar a pesquisa e orientar o estudo.

2.1 SOLOS SULFETADOS/SULFATADOS

Solos são elementos formados a partir do processo de intemperismo das rochas. De acordo com Das e Sobhan (2014, p. 11), “as propriedades físicas do solo são determinadas, em princípio, pelos minerais que constituem suas partículas e, portanto, pelas rochas das quais se derivam e também pelo clima no qual são submetidos ao intemperismo”.

Sabe-se que as rochas são formadas por processos distintos, dando origens a rochas denominadas como magmáticas, metamórficas ou sedimentares. Cada tipo de rocha terá uma composição mineralógica distinta, e dessa forma, o solo formado pelo processo de intemperismo terá em suas características esta heterogeneidade. Dessa forma fica claro, que o principal elemento que dará as características do solo são os minerais que irão compô-lo.

Segundo Chiossi (2013) entende-se como matéria mineral os elementos formados por processo inorgânico na natureza e que possuem composição química definida. Sendo assim, cada mineral, apresentará propriedades físicas bem determinadas, como brilho, cor, traço, clivagem, fratura, dureza, tenacidade, magnetismo e peso específico.

Além das propriedades físicas, os minerais também apresentam propriedades morfológicas e propriedades químicas. No caso das propriedades químicas, Chiossi, (2013, p. 20), ressalta que a composição dos minerais é o que permite classificá-los como óxidos, silicatos, carbonatos, sulfatos e sulfetos, sendo estes dois últimos os alvos de estudo deste capítulo.

Logo, como os minerais, que são os elementos que irão compor o solo e, possuem em sua composição um ou mais elementos químicos, tem-se que estes elementos em contato com temperaturas elevadas, água ou outros fatores, podem sofrer um novo processo de reação química, o que pode levar à formação de novos materiais com novas características.

Este processo de transformação é o que acontece com solos que possuem em sua composição minerais que ao entrarem em contato com a água ou algum outro composto, podem sofrer reações químicas e se transformarem em elementos minerais, em alguns casos, expansivos. Solos ricos em compostos químicos de sulfeto/sulfato tem a característica de formarem tais minerais expansivos, e esses novos minerais podem provocar alterações no comportamento do solo.

Uma semelhança entre sulfetos e sulfatos está em sua composição química. O enxofre ocorre como constituinte destes elementos. Machado, (2000), diz que uma vez que o enxofre (S) pode receber dois elétrons para preencher as duas vacâncias situadas na camada eletrônica exterior gerando os sulfetos, e para situações onde o enxofre é capaz de compartilhar os elétrons com oxigênios geram as unidades de SO_4 , que constituem a unidade fundamental dos sulfatos.

Kotz, *et al.*, (2015, p. 81), explica que aos oxiânion que possuem maior número de átomos de oxigênio é dado o sufixo –ato, para os oxiânion que possuem um menor número de átomos de oxigênio o sufixo –ito. No caso, dos íons de sulfeto, o autor os caracteriza com íons monoatômicos. Dessa forma, quando se trata de íons de sulfeto, Martins, (2002), explica que estes podem ser de diversos tipos, como sulfetos de cromo, manganês, mercúrio, zinco, níquel, ferro, prata, estanho, chumbo, bismuto, cádmio, antimônio, cobre, cobalto, molibdênio, etc.

Queiroga, (2006, p. 50), explica que rochas do tipo *metachert*, contém minerais opacos com grande presença de sulfeto, incluindo a pirrotita, pirita e ilmenita, e que estes minerais aparecem como minerais acessórios. Neste caso, o importante é observar quais os tipos de minerais possuem em sua composição elementos sulfetados. Assim, é importante ressaltar que, solos provenientes de minas de ouro, apresentam em sua composição a pirita, um dos elementos ditos como sulfetados.

Dessa forma, é possível ter um parâmetro de onde vem os solos com alta concentração de sulfetos. Estes solos irão surgir a partir dos minerais que compõe a rocha matriz, e dessa forma comporão o solo residual jovem. Além destes minerais, Queiroga, (2006, p. 51) complementa outros minerais sulfetados, proveniente de rochas sulfetadas, como pirita botrioidal, calcopirita, esfalerita, covelita, marcassita e arsenopirita.

Como definido anteriormente, uma composição comum que pode ser notada em todos esses minerais é a presença do elemento químico enxofre (S). A partir desse fator, buscou-se informações sobre elementos sulfetados que podem aparecer presentes em material proveniente da mineração de ouro. O Quadro 1, alguns exemplos de minerais sulfetados, indicando o nome do mineral, sua fórmula química e principais locais de origem, sua elaboração foi possível através de informações retiradas de Oliveira & Brito (1998), Machado, (2000), Queiroga, (2006) e Chiossi (2013).

Quadro 1 – Exemplo de Minerais Sulfetados

Mineral	Fórmula	Composição Química	Locais de Origem
Pirrotita	FeS	Sulfeto de ferro. 39,6% S, 60,4% Fe	Ocorre em rochas magmáticas básicas e intermediárias, rochas metamórficas de médio a alto grau. Ocorre também em maciço vulcanogênico.
Pirita	FeS_2	Disulfeto de ferro. 53,4% S, 46,6% Fe	É o mais abundante de todos os sulfetos. Gerado por processos metamórficos, magmáticos, hidrotermais e sedimentares ou diagenéticos em ambiente redutor.
Calcopirita	$CuFeS_2$	Bisulfeto de cobre e ferro. 34,5% Cu, 30,5% Fe, 35,0% S	É a maior fonte de cobre na maioria dos depósitos minerais. É encontrada em depósitos hidrotermais, rochas magmáticas, rochas metamórficas de contato.

Fonte: Adaptado de Chiossi (2013), Machado (2000), Oliveira & Brito (1998) e Queiroga, (2006).

No geral, Machado, (2000) afirma que os sulfetos têm sua origem através da cristalização o magma com presença de sulfeto de hidrogênio (H_2S) em sua fase fluida. Quando maior a pressão de H_2S , maior será a quantidade de sulfeto, podendo o enxofre ser a base de um magma sulfetado, que é insolúvel.

No caso de minerais com presença de sulfato, sabe-se que o íon comum entre os minerais é o radical SO_4^{2-} . Machado, (2000), explica que os sulfatos anidros são os mais importantes, e, os mais comuns são os membros do grupo da barita, com grandes cátions bivalentes coordenados com os íons sulfato. No caso dos sulfatos hidratados, a gipsita é a mais importante e abundante. Logo, para ter uma representação geral de alguns minerais sulfatados, sua fórmula química e principais locais de origem, foi elaborado o Quadro 2, com base em informações coletadas de Oliveira & Brito (1998), Machado (2000) e Zhanga *et al.* (2015).

Quadro 2 – Exemplo de Minerais Sulfatos

Mineral	Fórmula	Composição Química	Locais de Origem
Gipsita	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Sulfato de cálcio hidratado. 46,6% SO ₃ , 32,5% CaO, 20,9% H ₂ O.	Forma-se nos evaporitos, normalmente como produto de hidratação da anidrita, fumarolas, decomposição (oxidação) de sulfetos e veios hidrotermais sulfetados de baixa temperatura e pressão.
Anidrita	$CaSO_4$	Sulfato de cálcio. 58,8% SO ₃ , 41,2%CaO.	Frequentemente encontrada em formações sedimentares, como calcários, constituindo camadas de sal.
Etringita	$Ca_6Al_2(OH)_{12}(SO_4)_3 + 26H_2O$	-	Formada normalmente a partir da mistura da Ca com a água.

Fonte: Adaptado de Machado (2000), Oliveira & Brito (1998) e Zhanga *et al.*, (2015).

É importante ressaltar que os sulfetos são uma das principais pontes para a formação de sulfatos. Logo, a presença de um dos elementos pode ser o suficiente para a produção do outro. Basta a concentração certa com o reagente ideal. Segundo, Kotz *et al.* (2015), uma forma simples de representar essa ligação é através da reação:



Na qual, tem-se que da esquerda para a direita por oxidação o sulfeto se transforma em sulfito que se transforma em sulfato. Se a reação acontecer da direita para a esquerda, será um processo de redução no qual o sulfato se transforma em sulfeto. Essas transformações são constantes e em equilíbrio. É importante ressaltar, que a redução pode acontecer devido processos químicos ou biológicos. E a oxidação ocorre devido um processo de agitação.

É importante observar que não apenas a umidade tem influência sobre a deterioração do solo relacionada a presença de sulfato. Lovato, (2004), revela que outros fatores como outros íons, pH, grau de carbonatação e temperatura, também são fatores capazes de gerar reações indesejadas.

Além disso, ao se tratar de resíduos sólidos, estes devem ser classificados conforme a NBR 10.004:2004 – *Resíduos Sólidos – Classificação*, que tem por objetivo classificar “os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública”, assim, a Norma divide os resíduos em 2 classes, classe I, os resíduos perigosos e a classe II, os resíduos não perigosos.

Nesse aspecto, em seu Anexo G, a NBR 10.004:2004, apresenta os limites de concentração máximos sulfato no extrato de solubilização que permitirá a classificação do resíduo. De forma que, resíduos classificados como classe II tem a possibilidade de serem reutilizados.

2.2 COPRODUTOS SIDERÚRGICOS DE DESSULFURAÇÃO

Com a evolução das tecnologias, novos materiais foram surgindo no decorrer dos anos, como ligas de aço mais leves e trabalháveis. No caso dos produtos siderúrgicos, é possível encontrar sua aplicação em diversos setores, como na construção civil, no agronegócio e nas indústrias de eletrodomésticos, automóveis e na geração de energia. – PROCESSO SIDERURGICO MODIFICADO SURGINDO ASSIM NOVOS COPRODUTOS SIDERURGICOS NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AÇO.

Segundo ACOBRASIL (2015), a produção de aço pode ser vista como um “forte indicador do estágio de desenvolvimento econômico de um país”. Principalmente se for observado que a maior parte das tecnologias e utensílios utilizados na atualidade são provenientes das ligas de aço.

Segundo publicação feita pelo ACOBRASIL (2015), o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), verificou que mais de 50% da matéria-prima em peso utilizada na produção de carros e geladeiras é de aço. Isso é comprovado através da divulgação feita pelo próprio Instituto Aço Brasil, que relata que no ano de 2015, o setor produziu 33,3 milhões de toneladas de aço bruto, 31,8 milhões de toneladas de produtos siderúrgicos, o que proporcional um saldo comercial de US\$ 3,5 bilhões de dólares, deixando o Brasil no patamar de 11º Exportador Mundial de aço (exportações diretas).

Só que associado à produção intensa de aço, tem-se a produção maior dos coprodutos siderúrgicos. Segundo estudo feito pela Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, em 2008, a indústria siderúrgica gera por tonelada de aço produzidos, cerca de 700 quilos de resíduos sólidos.

No que confere a classificação destes resíduos produzidos na indústria do aço, a Resolução CONAMA 313, publicada em outubro de 2002, define o resíduo sólido industrial como todo o resíduo que resulte de atividades industriais, independente do estado que este se encontre, no qual, suas particularidades o tornem inviável para

seu lançamento na rede pública. Para esses produtos, cabe realizar um processo de tratamento, reciclagem e/ou recuperação para proporcionar sua reutilização.

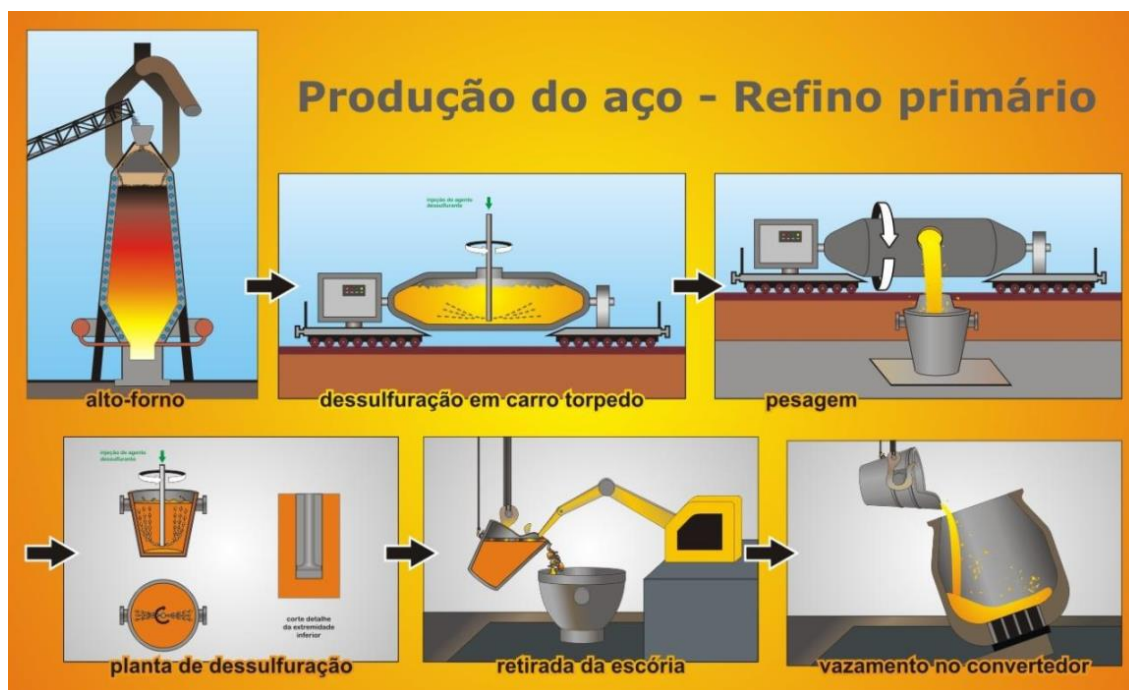
No intermim da classificação dos resíduos siderúrgicos, Diniz, (2009) *apud* BARBOSA, (2013, p. 32), classifica a escória de aciaria, segundo a NBR 10.004:2004 e dada como um resíduo Classe II-A – Não Inerte, essa classificação se confirma em estudos feitos por outros autores como, Reschke, (2003, p. 90).

Dessa forma, surgem os coprodutos siderúrgicos, que são provenientes dos resíduos são na indústria de aço, e que passam a ganhar espaço no mercado, principalmente na construção civil. Para tanto, foi criado o Centro de Coprodutos Aço Brasil – CCABrasil, que tem por objetivo auxiliar no desenvolvimento dos coprodutos siderúrgicos, bem como promover sua aplicação de forma sustentável, no sentido ambiental, social e econômico.

Os coprodutos siderúrgicos se dividem em uma série de produtos que tem sua aplicação em vários setores da construção civil. Segundo definição apresentada pelo fabricante Gerdau, (2017), esses coprodutos representam uma alternativa de matéria-prima sustentável para a indústria da construção civil, e sua aplicação pode ser vista em estradas, pavimentações, lastros ferroviários, fundações, etc. A CCABrasil, complementa que a aplicação dos coprodutos pode ser verificada em estradas vicinais, muros gabião, *rip-raps*, corretivos e fertilizantes de solos, por exemplo.

Dentre os diversos coprodutos produzidos, tem-se destaque para as escórias de aciaria e as escórias de alto forno. Dentro desse processo, segundo Fernandes, (2010, p. 10), as escórias podem ser geradas ao se processar na fusão redutora dos minérios para a obtenção do ferro-gusa. Em linhas gerais as escórias são resíduos gerados na produção de aço e que conseguem ser aplicados como produtos em determinadas áreas. A Figura 1 apresenta um esquema simplificado sobre a produção do aço.

Figura 1 –Esquema da Produção do Aço

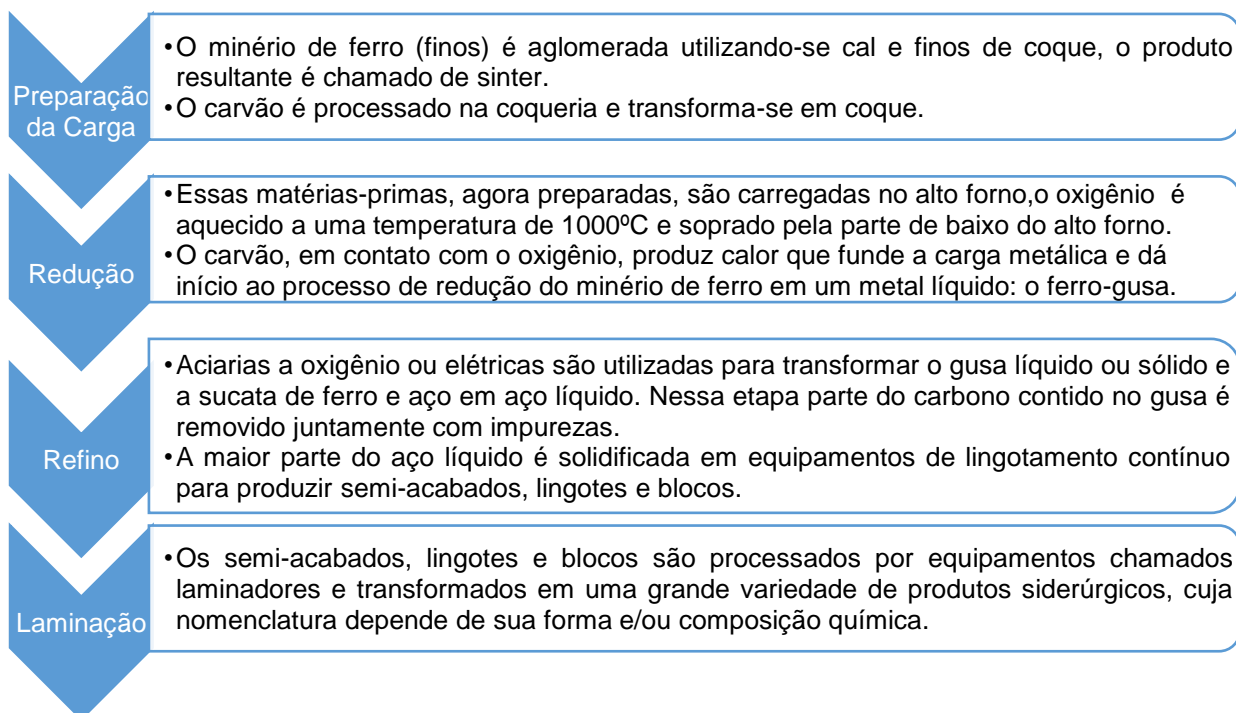


Fonte: Adaptado de CCABrasil, (2017)

Os coprodutos siderúrgicos surgem a partir a produção do ferro-gusa. Segundo trabalho publicado por Rizzo, (2006), os principais constituintes químicos do ferro-gusa são o Ferro (Fe), o Carbono (C), o Manganês (Mn), o Silício (Si), e o Enxofre (S). De forma que, estes elementos quando em contato com o oxigênio sofrerão reações químicas capazes de produzir parte da energia necessária para o aquecimento do aço durante a operação do convertidor a oxigênio.

Pedrosa, (2010), explica que no processo de fabricação do aço, tem-se a um processo inicial onde ocorre a mistura do ferro gusa líquido, com sucatas ferrosas, escorificantes (cal e fluidificante) e oxigênio. A ACOBRASIL, (2015), divide esse processo de em 4 etapas, sendo estas o processo de preparação da carga, a redução da matéria-prima, o refino e a laminação, Figura 2.

Figura 2 - Etapas do Processo Siderúrgico



Fonte: Adaptado de ACOBRASIL, (2015)

Na etapa de redução da matéria prima no alto forno um resíduo é produzido, denomina como escória de alto forno, já na etapa seguinte, de refino, são produzidos os resíduos denominados por escórias de aciaria. Esses produtos são denominados hoje na indústria siderúrgica como Coprodutos Siderúrgicos.

Segundo o CCABrasil, (2017), a principal aplicação da escória de alto forno é na fabricação de cimentos, enquanto que a escória de aciaria tem sua aplicação voltada para lastros ferroviários, sub-bases, bases de pavimentos rodoviários, estradas vicinais.

Na atualidade, um novo Coproduto Siderúrgico vem ganhando espaço no mercado da construção civil, principalmente para aplicação em base e sub-base de pavimentos, que é a escória produzida durante o processo de dessulfuração do ferro gusa líquido em Reator *Kanbara*.

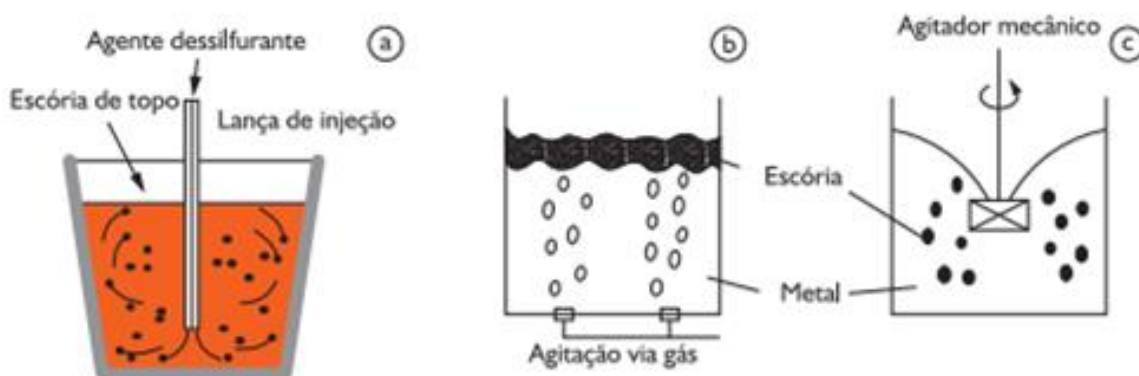
Kirmse, (2006), explica que a denominada Escória de Dessulfuração é produzida entre os processos de redução e refino, com o objetivo de se fazer um refino no aço líquido produzido, ou seja, uma redução na concentração de enxofre, o que fornecerá um material mais resistente.

Diante deste processo, Lemos, *et al.* (2011), propuseram um estudo sobre o aumento da eficiência de dessulfuração da gusa líquido neste reator, no qual os resultados encontrados indicaram concordância na eficiência da dessulfuração. Em contrapartida Kirmse (2006), afirma que a eficiência na remoção de enxofre do gusa, dependerá de condições estritamente metalúrgicas, porém as mesmas variam com o sistema aplicado, sendo quase sempre requisitantes de ambientes redutores (baixos teores de FeO), básicos e com altas temperaturas.

No geral, Silva, (2012), afirma que, dentre os fatores que influenciam a dessulfuração destaca-se que o óxido de cálcio (CaO) deve ser o maior constituinte, de forma que o potencial de O_2 , seja conciso para que a dessulfuração em banhos metálicos com adequado grau de desoxidação e como é uma reação metal/escória a escória também precisa estar desoxidada. Além disso, Kirmse, 2006, afirma que o Cálcio é um elemento que possui características especiais na ligação com o enxofre abaixo de $1500^{\circ}C$, e isso facilita o processo de reação na dessulfuração.

Essa maior concentração de CaO ocorre devido a necessidade de retirar o enxofre da gusa, sendo esse processo denominado de refino da gusa. Segundo Kirmse, 2006, na dessulfuração, a gusa é misturada ao agente dessulfurante dentro da panela de gusa, na qual ocorre a adição de carbonato de sódio (Na_2CO_3) e calcário antes do lançamento da gusa. Esse processo deve acontecer a temperaturas elevadas e a agitação do banho deve ser acelerada para aumentar a reação, Figura 3.

Figura 3 - Métodos Industriais de Dessulfuração do Gusa Líquido na Panela



Lemos, *et al.* (2011), explicam que na etapa 3a. ocorre injeção profunda do reagente, em 3b. a adição do reagente sobre a superfície do banho seguida de uma agitação consequente da passagem de fluxo gasoso, e por fim em 3c. ocorre a adição do reagente sobre a superfície do metal e a dispersão das partículas do reagente devido a agitação mecânica. Lemos, *et al.* (2011), ainda ressaltam que, durante a injeção de particulados sólidos nos banhos metálicos existe uma fração mínima de dispersão, enquanto que no processo de agitação, via o Reator *Kanbara* (KR), o grau de dispersão pode atingir e se manter em 100% durante toda a operação de dessulfuração.

2.3 ESTABILIZAÇÃO E MELHORAMENTO DE SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO

O solo utilizado na construção das estradas deve obedecer a requisitos mínimos para garantir a segurança do usuário, bem como, a qualidade da rodovia, o que garante a vida útil da estrutura. Como os solos são elementos formados a partir do processo de intemperismo das rochas, esse processo normalmente agrega ao material características heterogêneas.

Associado ao fator de formação do solo bem como sua composição físico-químico, frequentemente, o processo de construção de rodovias se depara com a falta de material adequado para aplicação como base e sub-base das estradas. Nesse âmbito surge o processo de melhoramento e estabilização do solo.

Dessa forma, no âmbito deste tópico serão apresentadas as técnicas mais comuns para a estabilização físico-químico, principalmente a técnica do solo estabilizado com resíduo siderúrgico, hoje denominado por algumas empresas como coproduto. É importante ressaltar que o coproduto por ser um resíduo oriundo do processo siderúrgico, a sua aplicação para estabilização do solo se torna vantajosa tanto no processo mecânico, quando no processo sustentável, visto que, passa a ser uma reutilização de resíduo sólido, por isso o enfoque maior da pesquisa está voltado para o coproduto siderúrgico.

Segundo Oliveira, (2011, p. 15), o processo de estabilização do solo pode ser resumido como um processo de natureza física, físico-química ou mecânica, estando normalmente associado ao processo de compactação, ou seja, quando à necessidade

de alterar as características estruturais, como capacidade de carga. Azêvedo (2010), denomina a este procedimento, processo de estabilização do solo.

Já o solo melhorado, é descrito por Azêvedo, (2010), como o solo a que se é adicionado a algum composto a fim de melhorar algumas propriedades consideradas prejudiciais, quando se trata de pavimentação, como a expansão, umidade excessiva e plasticidade elevada.

As técnicas para a estabilização e melhoramento do solo são utilizadas desde muitos anos. Herrin e Mitchell (1961, *apud* NÓBREGA, 1988 p.6), afirmam que vários povos já usavam técnicas de estabilização do solo, como cal, há mais de 2 mil anos. Estas técnicas se dividem em técnicas de estabilização físico-químicas e mecânicas, sendo a primeira representada pela adição de materiais como a cal ou cimento, e a segunda ocorre pelo mecanismo de compactação.

As técnicas de estabilização físico-químicas, podem ser entendidas como processos de tratamento do solo muito bem estabelecidas, e, têm sido amplamente utilizadas para melhorar o suporte de capacidade de cargas de solos moles onde são implantadas as obras da construção civil, como fundações e pavimentos rodoviários, além de melhorar outras características como permeabilidade e plasticidade, por exemplo.

Quando se trata da estabilização feita com a utilização da cal, existe uma gama muito grande de autores que realizam trabalhos na busca de melhorar o solo para aplicação em base e sub-base na pavimentação. Em sua pesquisa, Azêvedo, (2010, p. 24), realiza um estudo sobre a relação do solo quando estabilizado por cal. Em suma, o autor define solo-cal como [...] “uma mistura de solo, cal e água em proporções determinadas por ensaios de laboratório, sendo o seu produto algo capaz de ser usado em qualquer das camadas do pavimento, não asfálticas” [...].

Apesar de ser uma técnica muito antiga, Nóbrega, (1988), afirma que, esta técnica de estabilização só foi efetivamente retomada e utilizada após a 2ª Guerra Mundial, inicialmente nos Estados Unidos, onde teve grande impulso a partir de 1955.

O objetivo da aplicação da cal ao solo é melhorar o que autores denominam como características primárias, de forma a alterar as propriedades que apresentem algum tipo de fragilidade. Delgado, (2007, p. 52), afirma que, após o contato da cal com o

solo, ocorreram mudanças nas propriedades físicas da mistura, e que a literatura considera como principais mudanças as apresentadas na Quadro 3.

Quadro 3 - Possíveis Alterações nas Propriedades do Solo a partir da Adição de Cal

Adição de Cal ao Solo	
No caso da compactação, para uma mesma energia, ocorre diminuição do valor da densidade máxima seca e aumento do valor da umidade ótima;	Alteração da granulometria, pela floculação das partículas originais;
A expansão e contração, que sofrem uma redução de valores, ou seja, uma menor variação volumétrica;	Mudança nos limites de Atterberg, cuja alteração mais notável se relaciona ao limite de plasticidade, que normalmente aumenta;
Aumento na capacidade de suporte.	

Fonte: Adaptado de Delgado, (2007)

Dentro das possíveis alterações propostas para após a adição de cal ao solo, deve-se observar a expansão volumétrica, visto que, em algumas situações esses valores podem aumentar. Nesse aspecto, Lovato, (2004, p. 10), revela que alguns processos estão associados ao processo de estabilização de solo com adição de cal, no quais podem se identificar a troca catiônica, floculação-aglomeração, adsorção de cal e reações químicas.

A essas reações químicas, Zhanga, *et al*, (2015), afirmam a estabilização de solos com estabilizantes a base de cal pode provocar reações capazes de produzir minerais expansíveis. Esse é um fator de relevância, visto que um material com expansão elevada não é aceitável para aplicação em rodovias. Porém, por se tratar de uma técnica simples, e de baixo custo, a utilização de solo-cal é uma das técnicas mais implantadas para estabilização de solos, principalmente quando aplicados a pavimentação rodoviária.

Segundo Nóbrega, (1988, p. 6), após a homogeneização do solo com a cal, este deverá ser levado à umidade ótima de compactação, e em seguida, ser aplicado com a energia de compactação prevista em projeto. A particularidade está no fato de que essa camada de solo deve ser regada e protegida para se evitar a perda de umidade. Entretanto durante esse processo, Al-Swaidani, *et al*, (2016), confirmam o fato de que, em suas análises, as estruturas das misturas mostraram mudanças significativas na microestrutura do solo tratado, o que recai na possibilidade da formação de minerais expansíveis.

Esse aspecto se evidencia ao se estabilizar solos com presença de minerais sulfetados/sulfatados. Segundo Zhanga *et al.*, (2015, p. 199), o principal problema no caso de solos ricos em sulfato, é que, quando estabilizados com cálcio, que é a base da cal, apresentam a formação de alguns minerais de caráter expansivo, como a etringita.

Isso ocorre quando o solo com presença do aditivo entra em contato com a água e acaba sofrendo processos de modificação na sua composição química e mineralógica, gerando um material de caráter expansivo. Esse tipo de transformação acaba gerando impactos patológicos nas estruturas onde a aplicação destes materiais.

Um outro material muito utilizado para o melhoramento e estabilização do solo para aplicação em rodovias é o cimento. Vieira (2010) define cimento como:

Um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece em virtude das reações e processos de hidratação e que, depois de endurecer, mantém a sua resistência e estabilidade mesmo debaixo de água.

Dessa forma, fica intuitivo a explicação do porquê utilizar o cimento como um material para estabilizar e melhorar as características do solo. A estabilização do solo com cimento pode ser entendida segundo Concha, (1986, p. 12), com um “processo químico, no sentido de que se desenvolvem reações químicas do cimento hidratado, no qual são desenvolvidos vínculos químicos entre a superfície do grão de cimento e o grão de solo”.

O cimento aplicado a estabilização de solo, segundo Azzam (2014), foi primeiro agente utilizado para o melhoramento das características do solo. Sua aplicação ocorreu no início do século 20, onde o cimento foi misturado com solo, de modo a formar, um material de resistência para utilização em estradas. Pitta (1995 *apud* OLIVEIRA, 2011, p. 18), complementa que “as primeiras notícias de tentativas de se obter um material de construção econômico durável e de propriedades tecnológicas bem definidas, por meio da mistura de solos com cimento, vêm na Flórida – Estados Unidos, em 1915”.

A incorporação do cimento ao solo é uma técnica muito utilizada para estabilização de solos pois, tem como premissas melhorar características como a resistência ao cisalhamento, os limites de *Atterberg* e a sensibilidade à água. Tanto que, afim de se padronizar o método, surge em 1992 e foi revisado em 2012, a NBR 12023 – *Solo-*

cimento, Ensaio de Compactação, que define o solo-cimento como um “produto endurecido, resultante da cura de uma mistura íntima compactada de solo, cimento e água, em proporções estabelecidas através de dosagem.

Além disso, um aspecto que pode influenciar nos resultados do solo com adição de cimento, é o método de dosagem adotado. Os métodos mais comuns são, o da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, que traz para esse assunto a NBR 12253:2012 – *Solo-cimento, Dosagem para emprego como camada de pavimento*, adotado neste estudo e o método Físico-Químico, que segundo Rodrigo Oliveira, (2011), criado por Ceratti & Casanova em 1988 é considerado como um método promissor e de fácil execução.

Quando o solo tem um intuito de ser melhorado para ser utilizado em pavimento rodoviário, as propriedades físicas mais comuns a serem alterados serão a redução do índice de plasticidade (IP) através do aumento do limite de plasticidade (LP) e da diminuição do limite de liquidez (LL), ou diminuir as mudanças de volume e expansão do solo.

De acordo com Choudounsky e Viecili (2007 *apud* RODRIGO OLIVEIRA, 2011, p. 25), existem uma diferenciação entre as terminologias para classificar a adição do ligante (cimento), ao solo, em função de seus objetivos finais. Sendo que, “quando a incorporação do cimento objetiva o incremento de resistência, denomina-se solo-cimento (SC), no entanto, quando à utilização do ligante apenas para controle da plasticidade e expansibilidade do solo, denomina-se solo melhorado com cimento (SMC)”. Desta forma, fica claro, e o já apresentado anteriormente, que existe diferença entre solo melhorado e solo estabilizado.

No geral, o solo estabilizado com cimento produz ótimos resultados no processo de estabilização e melhoramento do solo, mas, por ser um produto fabricado, e de custo considerável, não é visto como uma forma sustentável para o melhoramento e a estabilização do solo.

2.3.1 Estabilização e Melhoramento de Solo Sulfetado/Sulfatado

Como visto no tópico anterior, existem várias técnicas utilizadas para a estabilização dos solos, sendo cada uma com sua particularidade e promovendo alguns tipos de melhorarias, principalmente em suas características mecânicas.

Cal e cimento são os aditivos químicos mais empregados para a melhoria em subleitos de rodovias, bem como outras obras na engenharia civil, com o objetivo de melhorar propriedades do solo como o aumento de resistência. Porém, no caso de solos com concentração elevada de sulfeto e sulfato, Zhanga *et al.*, 2015, ressaltam a dificuldade em utilizar essas técnicas de estabilização para esses solos pois, como visto, estes elementos são característicos por serem expansivos quando em contato com os aditivos a base de cálcio.

Sochan e Marika, (2014, p.46), explicam que “na região sul-oeste dos Estados Unidos, este problema vem causando danos significativos para pavimentos rodoviários e outras estruturas”, logo é necessário se verificar até que ponto a utilização de estabilizantes a base de cálcio é viável para esta situação.

Além do solo natural, outros materiais podem apresentar concentrações elevadas de sulfeto e sulfato. No caso, materiais provenientes da mineração de ouro podem apresentar uma concentração maior destes íons.

Como exemplo desse processo, Sochan e Marika, (2014, p.53), também apresentam os resultados feitos com o resíduo extraído de uma mina de carvão que continha material com presença de sulfato. Este resíduo foi combinado com estabilizantes a base de cálcio, sendo, cal viva, cal hidratada e cimento *Portland*. Ao se realizar a adição desse material ao solo, em porcentagens definidas mas que, não ultrapassam 9%, observou-se uma expansão de 100%, conforme pode ser verificada na Quadro 4, que apresenta os resultados encontrados pelo autor.

Quadro 4 - Resultados de Expansão para Solos não Tratados e Estabilizados com Composto a Base de Cálcio

Estabilizador	Dosagem do estabilizador (%)	Umidade	Saturação	Sobrecarga de tensão (kPa)	Percentual final de Expansão (%)
Spoil alone	-	16.6	85.4	2	4.3
QL	3	18.3	85.1	2	10.1
QL	7	18.7	81.9	2	10.3
PC	3	17.2	89.9	2	8.
PC	7	17.6	89.2	2	7.
HL	1.5	1.5	88.4	4	5.
HL	3	19.2	85.2	2	12.1
HL	5	19.2	88.3	2	9.
HL	7	20.3	87.1	2	10.1
HL	9	22.1	95.0	2	8.
HL	3	19.2	4.1	4.1	9.
HL	3	19.2	8.2	8.2	8.
HL	3	19.2	85.2	16.6	6.6

Fonte: Adaptado – Sochan e Marika, (2014, p.53)

Logo, nota-se que a expansão que pode ser apresentada por solos ou resíduos com presença de sulfato e/ou sulfeto quando combinados com estabilizantes a base cálcio é bastante expressiva. Assim, cabe-se verificar se esses aditivos podem ser realmente utilizados, e, se sim, em que dosagem. É importante verificar se existem outros compostos que possam substituí-los.

A estabilização de solos (resíduos) como alta concentração seja em sulfeto/sulfato é um desafio para a engenharia. Isso ocorre, pois, os processos mais comuns para estabilização dos solos são com estabilizantes a base de cálcio, tais como cal e cimento. Devido a composição química desses materiais terem a presença de materiais muito reagentes, até mesmo com água, esses aditivos acabam não apresentando bons resultados para a estabilização desse tipo de solo.

Zhang *et al.*, (2015), propõem em sua pesquisa a estabilização de solos com presença de sulfato com um geopolimérico livre de cálcio em sua composição. Conforme, resultados mostrados em sua pesquisa, é possível notar que o aditivo proporciona a redução de expansão e o melhoramento em outras características como a resistência ao cisalhamento.

De acordo com Sherwood, (1962), o principal problema ocasionado com a mistura entre solos contaminados com sulfato e estabilizantes a base de cálcio é que o cátion

de cálcio (Ca^{2+}), presente na composição do aditivo, reage com as demais composições do solo e formam os minerais expansivos quando na verdade deveriam gerar materiais com caráter cimentícios.

Os minerais produzidos na reação estabilizantes a base de cálcio com solos sulfatados possui grande capacidade de expansão. Adams *et al.* (2008 *apud* ZHANGA *et al.*, 2015), afirmam que a etringita, que é um dos minerais que “podem ser produzidos nessa reação, com capacidade de expandir até 250%, quando exposto a água, e possui a característica de continuar a expandir”, isso devido ao crescimento dos cristais e/ou devido as reações de hidratação, levando a uma quantidade significativa de ondulantes que podem resultar em danos às estruturas leves tais como pavimento e edifícios residenciais.

Zhanga *et al.*, (2015), apresentam em seu estudo que o sul, oeste e sudoeste dos Estados Unidos, são regiões onde os solos ricos em sulfato estão presentes, e que a utilização de estabilizantes inadequados tem causado muitos danos, gerando um gasto de milhares de milhões de dólares para várias estruturas de construção, isso confirma os estudos realizados por Sochan e Marika em 2014.

Diante desse fenômeno comum que ocorre nos Estados Unidos, muitos estudos foram desenvolvidos com o objetivo de minimizar este problema. O primeiro relato, segundo Zhanga *et al.*, (2015), foi feito por Mitchell em 1986, que descreveu danos induzidos pela combinação de solos ricos em sulfato com estabilizadores à base de cálcio em Nevada, Texas e Geórgia.

Segundo Sivapullaiah, (2000, *apud* LOVATO, 2004, p. 36) a presença de sulfatos no solo além de formar minerais como a etringita e taumasita, inibem a formação de silicatos e aluminatos hidratados. Bhattacharja *et al.* (2003 *apud* LOVATO, 2004, p. 36), afirmam que a taumasita é formada através da combinação de sulfatos e da carbonatação. Enquanto a etringita se transforma em taumasita se houver fontes adequadas de carbonato (CO_3^{2-}) e sulfato (SO_4^{2-}).

Segundo pesquisa publicada pela *National Lime Association* dos Estados Unidos (NLA, 2000), o efeito dos sulfatos pode ser reduzido. A solução apresentada seria forçar o início das reações antes do processo de compactação do pavimento, ou seja, esperar de 24 horas até 7 dias, dependendo do teor de sulfato presente no solo. Isso se justifica pelo fato de que, os minerais expansivos, como a etringita, seriam

formados antes da compactação da camada, e assim o pavimento não sofria danos posteriores.

No documento apresentado pela NLA (2000, p. 4-5), são definidos os teores de sulfato relacionando com seu risco quando estabilizados com cal. Para teores menores que 0,3%, pouco risco, entre 0,3% e 0,5%, risco moderado, já teores de sulfato entre 0,5% e 0,8%, risco moderado a alto e por final, concentrações maiores que 0,8%, risco alto. Eles ainda concluem que, em solos com menos de 0,3% de sulfatos o potencial de compostos expansivos é baixo, no entanto, solos com concentração maior que 1% não devem ser estabilizados com cal.

Como o resíduo estudado foi obtido de uma mina de ouro, a probabilidade de este apresentar concentrações mais elevadas de sulfetos/sulfatos é grande, isso porque um dos principais componentes do ouro é a pirita, e muito provavelmente, o percentual destes compostos será alto, por isso a importância de ensaiar o resíduo com estes elementos, para verificar qual será seu comportamento, e assim evitar possíveis problemas.

No caso da avaliação feita durante os ensaios, foram avaliadas as características para serem evitados problemas na parte de desempenho voltada para à Engenharia e as análises químicas para garantir a qualidade do resíduo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a descrição da metodologia adotada, as etapas da pesquisa, incluindo os ensaios que foram realizados em laboratório. Assim, o estudo proposto pode ser classificado em dois aspectos, no âmbito de seus objetivos e com base nos procedimentos técnicos adotados.

Dessa forma, para se atingir os objetivos desta pesquisa, foi elaborado um estudo explicativo, que segundo Gil (2002, p.42-43), é a pesquisa que "têm como preocupação central identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos", sendo assim, o autor que ressalta que, "as pesquisas explicativas nas ciências naturais valem-se quase exclusivamente do método experimental".

De tal modo, para se obter embasamento para a realização do estudo, foi necessário a pesquisa experimental do Resíduo extraído da Mineradora de ouro. O intuito desse tópico então é apresentar o processo de coleta e preparação resíduo, as misturas utilizadas e os parâmetros adotados para os ensaios de caracterização geotécnica, mecânica, mineralógica e química.

A pesquisa proposta visa estudar o resíduo produzido após a extração do ouro e proporcionar uma melhoria nas suas características mecânicas, de forma que o material possa ser reutilizado dentro da própria mineradora. Isto foi feito a partir da adição de alguns aditivos para melhoramento e estabilização do solo em proporções pré-estabelecidas e, dessa forma, foi possível uma análise entre as condições iniciais do resíduo e as condições após a mistura com dos compostos.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

3.1.1 Ensaios Preliminares

Os aditivos utilizados junto ao do Resíduo de Mineração foram a Cal e o Coproduto Siderúrgico, no caso a Escória de Dessulfuração, denominada Escória KR. Foram realizados ensaios de Índice Suporte Califórnia – ISC preliminares, com apenas um

corpo de prova de cada mistura para se determinar efetivamente qual aditivo seria utilizado.

Ao analisar o comportamento deste resíduo, quando em contato com estes elementos, busca-se verificar se as características do resíduo sofreram melhorias, tanto de estabilização como de melhoramento, já que o objetivo final é obter uma mistura em condições mínimas para aplicação na pavimentação dentro da mineradora, que além de ter capacidade de carga, não pode apresentar prejuízos ao ambiente e à saúde humana.

Após a realização dos ensaios preliminares com a incorporação entre o Resíduo de Mineração com a Cal e o Resíduo de Mineração com a Escória de Dessulfuração, verificou-se que a escória proporcionou um aumento na capacidade de carga melhor que a cal.

Assim, os materiais utilizados passaram a ser o Resíduo de Mineração e a Escória de Dessulfuração. Esse fator, de imediato já se mostra uma vantagem, visto que, ao se incorporar esses dois materiais, tem-se a mistura de dois resíduos, e isso ambientalmente falando é fator de suma importância pois, está se aproveitando dois rejeitos.

3.1.2 Coleta das Amostras e Tipos de Resíduos

O levantamento dos dados se iniciou pela coleta das amostras do Resíduo de Mineração na mineradora Paracatu. A coleta da amostra foi realizada conforme NBR 9.604:2016 - *Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Procedimento*. Esse material foi ensacado e enviado para o Laboratório de Mecânica dos Solos, da Universidade Federal do Espírito Santo.

Como dito, para a pesquisa proposta foram utilizados o resíduo proveniente de uma mineradora de ouro (Resíduo de Mineração) e a Escória de Dessulfuração (Escória KR). Dessa forma, foram determinadas quais as misturas seriam adotadas para execução dos ensaios, Quadro 5.

Quadro 5 - Descrição das Misturas

Amostra	Descrição
Amostra 1	Resíduo de Mineração
Amostra 2	Escória de Dessulfuração
Amostra 3	Resíduo de Mineração com adição de 20% de Escória de Dessulfuração.
Amostra 4	Resíduo de Mineração com adição de 30% de Escória de Dessulfuração.
Amostra 5	Resíduo de Mineração com adição de 40% de Escória de Dessulfuração.

Fonte: Dados da Pesquisa, (2016)

Os percentuais definidos para incorporação entre os dois materiais foram feitos com base no primeiro percentual utilizado no ensaio preliminar que foi de 15% de escória e conforme outras pesquisas que utilizam percentuais a partir de 20%, por exemplo, Gonçalves, 2016.

3.1.2.1 *Resíduo de Mineração*

A estabilidade dos solos é um desafio a ser vencido em várias obras dentro da construção civil. Seja para a construção de uma edificação, um aterro sanitário ou a implantação de uma rodovia. O solo é o elemento que suportará as cargas de todos os elementos nele apoiados.

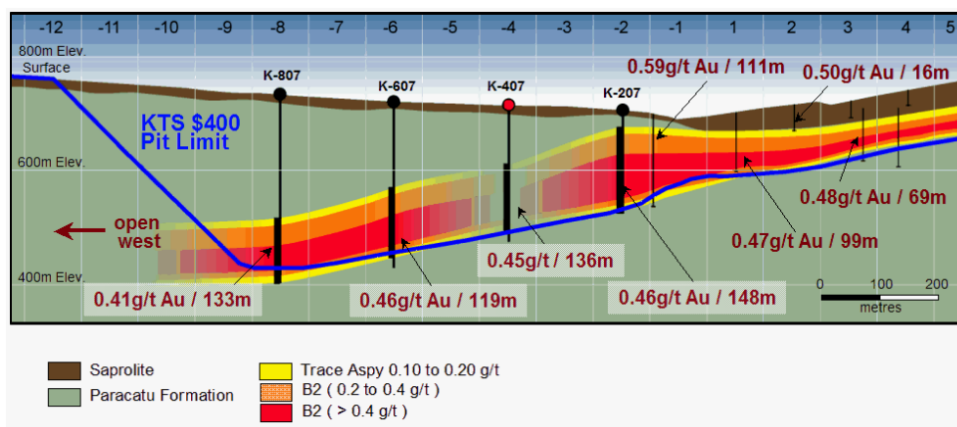
Dessa forma, é necessário conhecer as características mecânicas do solo, como sua resistência, para ter assim a segurança que este suportará as cargas nele aplicadas. No caso da pesquisa apresentada, pretende-se utilizar o resíduo produzido por uma mineradora de ouro como base e/ou sub-base para um pavimento de uma estrada vicinal, implantada na própria mineradora.

Diante de algumas pesquisas, foi possível verificar que as atividades realizadas por empresas de mineração de ouro são de grande importância para o desenvolvimento das regiões onde elas se instalam. Sendo que, esta mineradora é considerada como o mais importante empreendimento industrial da região, onde, aproximadamente 10% dos postos de trabalho formais da cidade são garantidos pela atividade na mineradora.

Assim, é de grande importância garantir a segurança em todas as áreas da mineradora, o que leva a necessidade de monitorar as estradas de acesso, além de, verificar uma solução para o rejeito produzido pela mineradora para este não prejudicar a população local.

Henderson, (2006), apresenta um perfil (Figura 4), de uma seção de sondagem longitudinal da região da mineradora onde é possível observar o teor do aurífero e a presença de sulfetos metálicos.

Figura 4 - Seção de Sondagem 07N – Vista para o Norte



Fonte: Henderson, 2006, p. 18-10.

Segundo Henderson, (2006), um dos grandes problemas da extração do ouro é a produção dos sulfetos. Em mineradoras de Ouro, os sulfetos predominantes são a arsenopirita (arsênio), a pirita (ferro), a pirrotita (pirita magnética) e em quantidades menores pode ser encontrada a calcopirita (cobre), a esfalerita (zinco) e a galena (chumbo).

Santos (2012), relata que o beneficiamento do ouro produz um rejeito de minério sulfetado. Esses materiais quando em contato com o ar e à água geram uma drenagem ácida. Sendo que, uma vez que está drenagem é criada os metais e metaloides como cobre, ferro, alumínio, arsênio e chumbo são liberados.

Esses materiais podem atingir os mananciais da região ou as águas subterrâneas se lixiviados para o subsolo. A ocorrência desse processo poderia gerar a contaminação das águas e assim prejudicar todos os seres vivos. Dessa forma, é evidente que tratar o rejeito produzido pela mineradora é uma necessidade que vai muito além de estocar esse material, mas sim dar uma destinação mais proveitosa para o rejeito.

Durante o processo de extração do ouro existe a produção de dois tipos de rejeitos. Lozano (2008) explica que no decapeamento da jazida são produzidos materiais sem nenhum valor econômico, que são denominados estéreis, estes são dispostos, normalmente, em pilhas e habitualmente são utilizados no próprio sistema da mineradora. O segundo material extraído é denominado por Lozano (2008) como

rejeito, sendo este, o material resultante do processo de beneficiamento. Por sua vez, o rejeito contém grau elevado de toxidade, além de partículas dissolvidas e em suspensão, metais pesados e reagentes.

É importante ressaltar que o Resíduo de Mineração analisado nesta pesquisa para reaproveitamento em estradas vicinais é o material denominado como estéreo no processo de extração do mineral.

3.1.2.2 Resíduo Siderúrgico – Escória de Dessulfuração

A Escória de Dessulfuração utilizada foi escolhida principalmente devido estudos anteriores realizados na Universidade que mostraram um desempenho relevante desse composto quando adicionado ao solo. Por exemplo, no trabalho apresentado por Gonçalves, (2016), a capacidade de suporte de uma das amostras apresentou um ganho de quase 3 vezes o valor inicial do ISC do material puro.

A escória utilizada já possui uma caracterização química prévia, fornecida pela empresa ArcelorMittal e publicada no trabalho de Gonçalves, (2016), no qual é possível identificar que este resíduo é classificado pela NBR 10.0004:2004, como material um Resíduo Classe II A – Resíduo Não Inerte. Outro fator relevante é a concentração de óxidos de enxofre presentes na caracterização química da escória fornecidos também pela ArcelorMittal, Quadro 6.

Quadro 6 – Composição Química da Escória de Dessulfuração

Elemento Químico	Quantidade (%)
Al ₂ O ₃	5,19
C	2,42
CaO	54,6
FeM	5,25
FeO	10,5
FeT	15,5
MgO	3,2
MnO	0,77
S	1,41
SiO ₂	9,92
ZnO	0,0001

Fonte: Gonçalves, (2016)

É possível observar que existe uma concentração de Enxofre (S) na amostra da escória, mas, mesmo em baixas concentrações ao se comparar com os demais elementos do Quadro 6, esse enxofre deve ser considerado visto que, a escória será

incorporada à um resíduo que por ser proveniente de uma mineradora de ouro, espera-se que este também apresente certa concentração de Enxofre.

Logo, a união destes dois materiais pode favorecer a formação de elementos sulfetados/sulfatados. Esses materiais em linhas gerais podem ser considerados metais pesados devido pois possui elementos com massa superior 5 g.cm^{-3} e/ou número atômico maior que 20, além disso possui capacidade de formar sulfetos e hidróxidos insolúveis em água, mas, são caracterizados como não tóxicos.

3.1.3 Caracterização Geotécnica e Físico-químico

A partir da coleta das amostras do resíduo de mineração, este foi ensaiado em laboratório. A primeira etapa realizada foi a preparação das amostras, feita conforme NBR 6457:2016: *Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Dentro desse processo laboratorial, o solo será caracterizado quando as suas características geotécnicas, mineralógicas e físico-químicas.

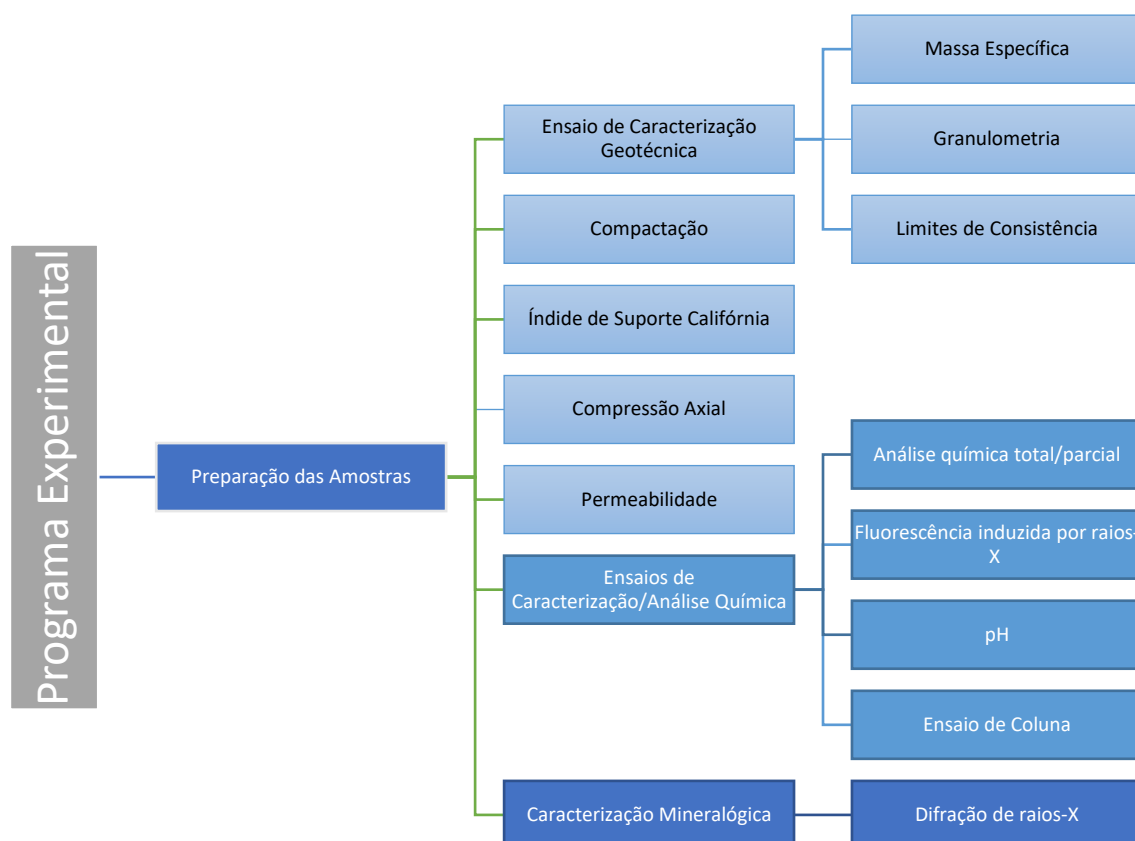
Para a caracterização geotécnica e análise do comportamento mecânico do material, foram realizados os ensaios de Granulometria, Limites de *Atterberg*, Determinação do Peso Específico Real dos Grãos, Permeabilidade, Compactação, Índice de Suporte Califórnia, PTM-130 e Compressão Axial.

Os ensaios para caracterização e análise química se resumem em análise química total – NBR 10.004:2004 – *Resíduos Sólidos*, análise química parcial – Capacidade de Troca de Cátions e pH. Estes ensaios são cabíveis já que, como relata Lovato, (2004), fatores como íons, pH, grau de carbonatação e temperatura, também são fatores capazes de gerar reações indesejadas, ou seja, contribuir para a formação de elementos expansivos em solos que contém sulfeto ou sulfato. Além disso, foram realizados os ensaios de fluorescência induzida por raios-X para complementar a composição química das amostras e identificar o perfil de concentração óxidos de enxofre, sendo que estes ensaios foram aplicados apenas nas amostras de resíduo e na escória de dessulfuração.

Para uma análise mineralógica, realizou-se o ensaio difração de raios-X, também feito apenas nas amostras 1 e 2. Já o ensaio de coluna foi feito com o objetivo de coletar a

água percolada em todas as amostras, e assim, verificar o comportamento relacionado a formação de sulfetos e sulfatos após os materiais serem misturados e lixiviados. A relação de todos os ensaios está indicada pelo fluxograma apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Sequência da Realização dos Ensaios



Fonte: Dados da Pesquisa, (2016)

3.2 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS E MECÂNICAS

3.2.1 Caracterização Geotécnica

Os ensaios laboratoriais para caracterização geotécnica são de fundamental importância para caracterizar o solo e classifica-lo conforme o Sistema Unificado de Classificação do Solo – SUCS e o sistema de classificação *Highway Research Board* – HRB. Ao ter essa classificação é possível compreender melhor o comportamento mecânico do material.

Como é de interesse que resíduo estudado possa ser aplicado como base ou sub-base para pavimento rodoviário em uma estrada vicinal, foram realizados ensaios que permitiram classificar em que tipo de solo o resíduo se enquadra.

O primeiro parâmetro a ser analisado é a massa específica. Sabe-se que a massa específica de um determinado material está associada a vários fatores, dentre os quais pode ser citado sua constituição mineralógica, ou seja, materiais que apresentam minerais mais densos, apresentaram por consequência massas específicas maiores.

De acordo com Silva (sd.), o valor da massa específica é de fundamental importância para elaboração de cálculos envolvendo por exemplo a porosidade, velocidade de sedimentação das partículas na água e até mesmo o grau de saturação. Neste intuito, para uma análise mais completa da interação dos materiais foram verificadas todas as massas específicas, ou seja, massa resíduo, a massa Escória KR, e a massa específica das combinações entre os materiais.

Todos os procedimentos para obtenção dos resultados seguiram as diretrizes da NBR 6458:2016 – *Solo – Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica, da Massa Específica Aparente e da Absorção de Água*. Os equipamentos utilizados foram devidamente calibrados e tabulados e, após a preparação das amostras, foram executados, Figura 6.

Figura 6 - Procedimento - Ensaio de Massa Específica



Observação: 1. Dispersão da Amostra. 2. Transferência da Amostra para os Picnômetros. 3. Picnômetro completado com Água Destilada. 4. Banho Térmico. 5. Calibração do Picnômetro com Solo para a Temperatura. 6. Transferência do Solo para o Becker Seco em Estufa.

Fonte: Dados da Pesquisa, (2016)

A partir da determinação da massa específica, foi realizado a caracterização granulométrica do material. Das e Sobhan, (2014, p. 11), afirmam que “os solos são formados a partir do intemperismo das rochas”, diante disso, têm-se que suas propriedades físicas são determinadas a princípio pelos minerais que os compõem.

Esse processo de intemperismo influenciará na determinação das partículas. Nesse aspecto, a determinação do tamanho dos grãos que compõem os materiais se faz de fundamental importância, visto que, esse fator associado a composição química do material influenciará diretamente seu comportamento mecânico.

Para classificar o material, é necessário entender como estão distribuídos os tamanhos dos grãos e qual é a sua consistência, por exemplo. Para isso, cabe a realização do ensaio de granulometria, executados conforme NBR 7181:2016, *Solo - Análise Granulométrica*, onde a análise foi feita por peneiramento e sedimentação com o uso de hexametáfosfato de sódio.

Para a análise granulométrica do Resíduo de Mineração, após análise visual, verificou-se que a quantidade mínima de material a ser ensaio deveria ser 8 quilos, pois, o material estudado possui uma quantidade considerável de grãos com diâmetros maiores que 25 mm. Em contrapartida, para caracterizar a granulometria da Escória de Dessulfuração bastou uma quantidade mínima de 1 quilo.

Seguindo os procedimentos determinados pela NBR 7181:2016, foram executados os ensaios de peneiramento grosso do material retido na peneira de 4,75 mm, e com o material passante na malha foi extraída uma fração para a execução do ensaio de sedimentação e posteriormente o de peneiramento fino.

Para a análise granulométrica do resíduo, foi separado um total de 24950 gramas de material para o ensaio. A escolha desta quantidade foi feita pela forma com que o material foi entregue em laboratório. Como o resíduo veio distribuído em sacos, optou-se por caracterizar o conteúdo completo de um saco. Todo o material foi destorroado conforme recomendado pela NBR 6457:2016.

Após destorroar todo o material, este foi passado na peneira de 2 mm, no qual verificou-se que 9050 gramas do material ficaram retidas e o restante que totaliza 15900 gramas passou. Diante disso, obteve-se as quantidades iniciais que seriam utilizadas para peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação.

Mas esses não foram os valores adotados, pois, durante o processo de destorroamento verificou-se a grande quantidade de finos que ficava aderida aos grãos maiores. O material retido na peneira de 2 mm, então, foi lavado e seco em estufa. Após este processo, a massa de material passou a ser 8355,9 gramas, o que leva a considerar que o material passante na peneira de 2 mm na realidade deveria ser de 16594,1 gramas, Figura 7.

Figura 7 - Ensaio de Peneiramento – Resíduo



Fonte: Dados da Pesquisa, (2016)

Da Escória KR foram separados um total de 1553,67 gramas de material. Deste material uma massa de 433,20 gramas ficou retido na peneira de 4,75 mm e o restante da massa passou na peneira. Para a sedimentação e peneiramento fino foram separados 105,72 gramas de material, Figura 8.

Figura 8 – Ensaio de Peneiramento – Escória de Dessulfuração



Fonte: Dados da Pesquisa, (2016)

Espera-se que a incorporação entre os dois materiais permita melhorar a curva granulométrica final das amostras, afim de se obter um material com uma curva mais próxima de uma curva bem graduada e/ou uma redução no índice de plasticidade.

Neste âmbito, para a determinação do índice de plasticidade se faz necessário realizar os ensaios que determinaram os Limites de Consistência. Fator este importante, visto que, segundo Caputo *et al* (2015), para solos cuja textura apresente certa porcentagem de fração fina, saber a granulometria do solo não é suficiente para caracterizá-lo, pois suas propriedades plásticas dependeram do teor de umidade, da forma das partículas e de sua composição química e mineralógica.

Dessa forma, foram feitas as verificações dos limites de consistência do material estudado em suas várias combinações. Para a determinação de tais limites de foram realizados ensaios específicos, conforme as normas NBR 6459:2016 – Solo – *Determinação do Limite de Liquidez* e NBR 7180:2016 – Solo – *Determinação do Limite de Plasticidade*.

A determinação do Limite de Liquidez foi feita a partir de um Aparelho de Casagrande elétrico, de contador automático. O equipamento foi devidamente calibrado antes de

todos os ensaios, conferindo a altura de queda de 1 cm a amostra com intensidade constante, Figura 9.

Figura 9 - Ensaio de Limite de Liquidez – Resíduo



Fonte: Dados da Pesquisa, (2016)

Para o ensaio de Limite de Plasticidade, tentou-se moldar pelo menos 3 cilindros de 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento, conforme recomenda-se a NBR 7180:2016, Figura 10.

Figura 10 - Procedimentos - Limite de Plasticidade



Fonte: Dados da Pesquisa, (2016)

O Limite de Plasticidade foi calculado a partir das médias entre as umidades encontradas, sendo que os resultados não poderiam variar mais que 5% em relação à média. Após a execução dos ensaios quando possível, foi calculado o Índice de Plasticidade do solo. Esse índice é a diferença entre os limites de liquidez e plasticidade, Equação 1.

$$IP = LL - LP$$

Equação 1

Segundo Das e Sobhan, (2014), o Índice de Plasticidade definirá o quão plástico é o material estudado. Caputo *et al* (2015), complementa que quando maior for o índice de plasticidade mais compressível será o solo.

3.2.2 Compactação

Para a realização do ensaio de compactação, foi seguido o proposto pela NBR 7182:2016, *Solo - Ensaio de Compactação*, que descreve os equipamentos, acessórios, processo de execução e cálculos utilizados para a execução do ensaio. Sendo que o objetivo final é obter a umidade ótima e o peso específico aparente seco máxima do material estudado.

O material foi seco ao ar e destorroado, sendo passado pela peneira de 4,75 mm, e preparado conforme NBR 6457:2016. Nesse processo, tem-se que a Norma apresenta os procedimentos necessários para a escolha do cilindro a ser utilizado no ensaio. No caso do resíduo, o peso do material retido da peneira de 19 mm foi maior que 10%, o que determina a utilização do cilindro grande para o ensaio e no caso, foi feita a substituição do material retido na peneira de 76,2 mm pelo material passante na 19 mm e retido na peneira de 4,75 mm.

Os ensaios de compactação em todas as amostras foram feitos com reuso do material, visto que, a quantidade de resíduo de mineração disponível para os ensaios era limitada. A umidade inicial adota para o primeiro ponto foi de 4%, sendo feito um incremento na umidade em média de 2,5% foi feito a cada novo ponto. O procedimento foi repedido até que o peso específico aparente seco obtido comece a reduzir, a partir desse ponto o ensaio foi repedido duas vezes.

3.2.3 Compressão Axial

Entende-se como compressão axial como a aplicação de uma carga sobre uma região, no caso da compressibilidade do solo, é o aumento de tensão que pode ser provocado pela construção de fundações, aterros ou estradas, por exemplo. Das, (2014, p.267), afirma que a compressão do solo é causada por “deformação das

partículas do solo, pelo deslocamento de partículas e pela expulsão da água ou do ar dos espaços vazios.

Dessa forma, o ensaio de compressão axial é realizado com o intuito de se verificar a relação entre tensão normal e deformação específica do solo. De acordo com Marangon, (2013), pelo fato deste ensaio acontecer em uma prensa do tipo aberta, (Figura 11), só é possível aplicar a pressão axial na direção vertical, uma vez que, a prensa sendo aberta não é possível a aplicação de pressões laterais.

Figura 11 - Equipamento - Compressão Axial



Fonte: Dados da Pesquisa, (2016)

Para a execução do ensaio todos os procedimentos adotados para preparação das amostras seguiram as orientações apresentadas na norma rodoviária do DNER-ME 202:1994 – *Solo-cimento – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos*, adotando o Método A. Essa escolha foi feita visto que o Método B é aplicado quando o material passa na peneira 19 mm e até 45% dos grãos são retidos na peneira de 4,8 mm.

As amostras preparadas foram alocadas em câmara úmida com tempo de cura de 7 dias e 28 dias, no intuito de verificar a interação entre o solo sulfetado/sulfatado e a escória, e conseqüentemente o ganho de resistência com o tempo.

3.2.4 Permeabilidade

Sabe-se que o solo é composto por três fases, a sólida a líquida e a gasosa, sendo que nos vazios dos poros encontra-se os elementos representantes das fases líquidas e gasosas, que são a água e o ar, respectivamente. Juntamente com a água presente nestes vazios, acontece o fenômeno de percolação de água no solo. Pinto, (2006, p. 113), ressalva que o estudo da percolação de água nos solos é muito importante pois pode evitar problemas práticos que acontecem, e divide esses problemas em três tipos, sendo que, existe um que é direcionado exatamente para esta pesquisa.

No caso deste estudo, as cargas aplicadas pelo tráfego de automóveis sobre a estrada não pavimentada construída com o resíduo proveniente da mina, pode sofrer essas deformações, e gerar estes recalques. Dessa forma, é possível notar que o estudo da permeabilidade do solo é um parâmetro muito importante a ser analisado em solos utilizados para pavimento rodoviário.

Diante disso, para complementar os ensaios, foi realizado o ensaio de permeabilidade com as amostras estudadas utilizando um permeâmetro de parede flexível, Figura 12. Para a execução deste ensaio foi seguida as diretrizes apresentadas pela norma D5084-10 – *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*.

Figura 12 - Equipamento - Permeâmetro de Parede Flexível

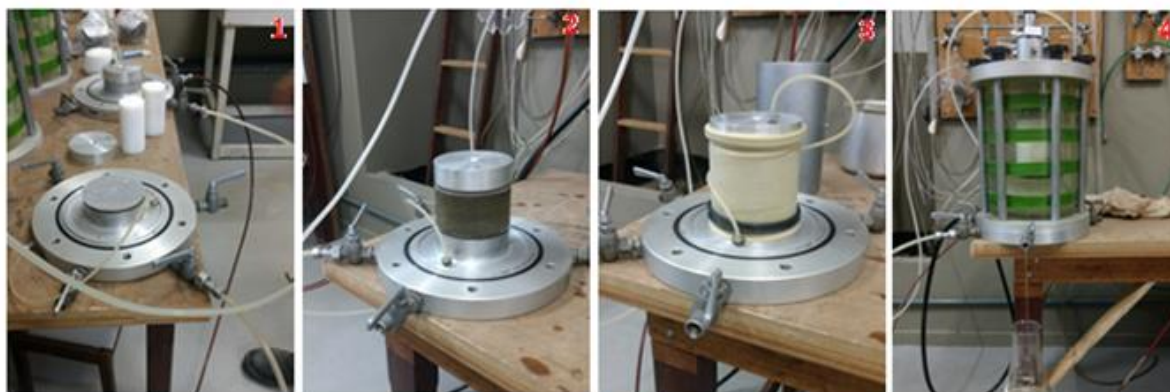


Fonte: Dados da Pesquisa, (2017)

Seguindo esse processo, para a construção das amostras, foi utilizado o processo de compactação, sendo as amostras moldadas em cilindro pequeno, compactadas com energia modificada. Os corpos de prova finais utilizados no ensaio apresentaram dimensões em média de 10 cm de diâmetro por 5 cm de altura, sendo que o material utilizado nas amostras foi o passante na peneira de 4,75 mm.

Os procedimentos adotados para inserir as amostras no permeâmetro seguiram as etapas representadas na Figura 13, onde na base do equipamento é inserida 1 - a pedra porosa saturada com papel filtro umedecido; 2 – o corpo de prova, papel filtro e pedra porosa no topo, seguido da placa metálica por onde a água irá percola; 3 – afixada dupla membrana para se evitar infiltração indevida; e por final, 4, onde o permeâmetro é fechado e devidamente travado.

Figura 13 - Procedimento - Permeâmetro de Parede Flexível



Fonte: Dados da Pesquisa, (2017)

A pressão de água confinante adotada foi de 3,00 kgf/cm² e pressão de água de contrapressão foi de 1,50 kgf/cm² em todos os ensaios, sendo as duas pressões mantidas constantes em todo ensaio. Além disso em todos os ensaios foi percolado um volume de água de no mínimo 3 vezes o volume de vazios respectivo de cada amostra.

3.3 AVALIAÇÃO DOS ADITIVOS NA CAPACIDADE DE SUPORTE

Como dito anteriormente, acredita-se que o resíduo alvo de estudo, é um material que apresenta expansão elevada, devido à presença de minerais expansivos. Para verificar tal deformação e a capacidade de suporte do resíduo é que se justifica a

execução do ensaio para a obtenção do Índice de Suporte Califórnia, (ISC) ou *California Bearing Ratio*, (CBR). Este ensaio é de suma importância na área da engenharia rodoviária. Segundo DNIT (2014) é a partir desse ensaio é possível obter a resistência penetração das bases de estradas e as propriedades expansivas do material. A norma adotada para a execução deste ensaio foi a revisada pelo DNIT em 2014, DNIT 049:2014 – ME, Solos – *Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio*.

Além disso, como existe a suspeita de que tal material apresente carácter expansivo, foram realizados ensaios complementares ao ISC para verificar o comportamento expansivo do resíduo, sendo esse o PTM-130. De acordo com Bernucci (2008, p. 339), “os materiais de pavimentação compactados devem apresentar-se resistentes, pouco deformáveis e com permeabilidade compatível com sua função na estrutura”. Diante disso, justifica-se a verificação da expansão do material estudo, de forma a verificar o quando este material pode sofrer variações volumétricas.

Todas as amostras foram preparadas adotando-se a umidade ótima do resíduo, e obedecendo o processo de substituição do material retido na peneira de 76,2 mm por proporções do material passante na peneira de 19 mm e retido na peneira de 4,75 mm. Além disso os corpos de prova compactados com energia modificada, foram imersos em tanques, onde estavam com sobrecarga e extensômetro devidamente calibrados, Figura 14.

Figura 14 - Amostras - Ensaio de Índice Suporte Califórnia



Fonte: Dados da Pesquisa, (2016)

Outro aspecto importante adotado nos ensaios é que devido as propriedades cimentícias do coproduto siderúrgico foram moldados corpos de prova para serem rompidos ao final das 96 horas como determina a norma, e outros que foram rompidos ao final de 28 dias, com o objetivo de se verificar o ganho de resistência com o tempo que as amostras apresentam.

3.4 AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICO

Nesta pesquisa foram realizados ensaios para a caracterização e análise química do Resíduo de Mineração e da Escória de Dessulfuração. Os ensaios se dividiram em análise química total, química parcial, pH, fluorescência induzida por raios-X e ensaio de coluna. O objetivo é obter as propriedades químicas do material que para serem relacionadas com as propriedades mineralógicas, e assim conseguir realizar uma caracterização total do material.

O processo de caracterização química se dividiu em 2 etapas. Na primeira delas para as amostras de resíduo e escória foram realizados ensaios de análise básica do material, com o objetivo de identificar os macronutrientes que compõem as amostras, seu pH, e a Capacidade de Troca de Catiônica – CTC.

O objetivo de se verificar a CTC das amostras surge da necessidade de se verificar qual o nível de intemperismo do material. Esse processo se torna importante para o estudo, visto que o resíduo analisado é proveniente de ações de meteorização. Já a verificação do pH tem o objetivo de apresentar uma análise comportamental do solo, visto que, segundo Buback, (2008, p. 46-48), o pH indica o índice de acidez do solo e a sua capacidade de condução de corrente elétrica.

3.4.1 Difração de Raio-X

De acordo com Buback, (2008, p. 48), o estudo da mineralogia do solo colabora para a discriminação dos minerais pressentes. Isso é importante, visto que, dependendo do mineral presente, comportamentos diferentes podem acontecer com o solo, como é o caso do material que apresenta minerais sulfetados e/ou sulfatados, ou seja, a presença desses materiais pode provocar a expansão do solo.

A Difração de Raio-X (DRX), é um ensaio essencial para identificar quais são os argilominerais presentes no material. Segundo Mitchell, (1993, *apud* BUBACK, 2008, p. 49), o argilomineral presente no solo controla características superficiais da partícula, assim como seu tamanho, forma, resistência, expansibilidade e plasticidade.

Para Guevara, (2007, p. 53), a “difração de Raios X permite identificar, de maneira qualitativa, a presença de minerais cristalizados nas amostras”, dessa forma o material de DRX permitirá definir os constituintes mineralógicos do solo como: carbonatos, sulfetos, quartzo e argilominerais.

Para a realização deste ensaio foram utilizadas 5 gramas de cada amostra para análise de seus compostos mineralógicos. A caracterização geral dos parâmetros adotados para execução do ensaio está representada no Quadro 7.

Quadro 7 - Detalhes da Coleção de Amostras/Dados

Nome da Amostra	Amostra 1	Amostra 2
Faixa de Dados (°)	4.000 a 70.000 graus	
Faixa de Dados de Número de Pontos	1651	
Comprimento da Escala	5	
Rigidez	1	
Largura do Recurso	0,12 graus	
Radiação	Cu	
Comprimentos de Onda	1.54056 e 1.54439 Angstroms	
Intensidades de Confiança	Sim	
Aplicar Restrições	Sim	Não

Fonte: Dados da Pesquisa, (2017)

Para execução do DRX do material fornecido foi utilizando o equipamento da marca *Rigaku*, Modelo Ultima IV, geometria *Bragg-Bretano*. Os procedimentos foram executados a uma temperatura de 23°C, com radiação de Cobre, comprimento de onda médio de 0.15419 nm.

3.4.2 Espectrometria de Fluorescência de Raios-X

Para uma análise mais completa dos elementos químicos que compõem o resíduo e a escória, houve a necessidade de se realizar o ensaio de espectrometria de fluorescência de raios-X, (FRX). Oliveira (2011), explica que a FRX é baseada em uma técnica não destrutiva que permite identificar os elementos que compõem uma amostra (análise qualitativa).

Com os resultados obtidos, pretende-se obter o traço dos principais elementos químicos que compõe o material. Como tem-se a expectativa de que o material apresente concentrações de sulfeto e sulfato, será possível verificar qual o percentual desses elementos químicos listados pela norma, além de classificar o material de acordo com as classes apresentadas pela norma, que classificam o solo como, perigosos, inertes e não inertes, (NBR 10.004:2004, p. 2).

Para esta análise do Resíduo de Mineração e a Escória de Dessulfuração, foram utilizadas 5 gramas de cada material aplicadas ao equipamento EDX-720 da marca *Shimadzu*. Por limitação do método, somente elementos entre Na (11) e U (92) foram analisados. Para a avaliação através do método de perda ao fogo, o material primeiramente foi seco em estufa por 24 h em temperatura de 110°C, posteriormente o mesmo material foi aquecido até 1000°C por 60 minutos.

Os resultados serviram para a identificação dos principais óxidos que compõem as amostras do resíduo e da escória.

3.4.3 Ensaio de Coluna

O ensaio de coluna foi realizado paralelo ao ensaio de permeabilidade utilizando o mesmo equipamento e as mesmas amostras. No caso do ensaio de coluna o objetivo foi coletar todo o volume de água percolado pelas amostras durante o processo de saturação e execução total do ensaio de permeabilidade.

Posteriormente essas soluções foram identificadas e analisadas para se obter as concentrações de sulfeto/sulfato. Esses resultados foram confrontados com os resultados provenientes das amostras preparadas com o extrato solubilizado e lixiviado dos materiais.

Por fim, para complementar a caracterização e análise química das amostras foi feito como dito anteriormente, em paralelo com o ensaio de permeabilidade o ensaio de Coluna. O objetivo deste ensaio é identificar o perfil de concentração de contaminantes e seus subprodutos.

Segundo material apresentado por Demuelenaere, (2004, p. 73), para a execução do ensaio é necessário a utilização de amostras indeformadas. Como o material é um resíduo, as amostras foram preparadas pelo processo de compactação descrito no

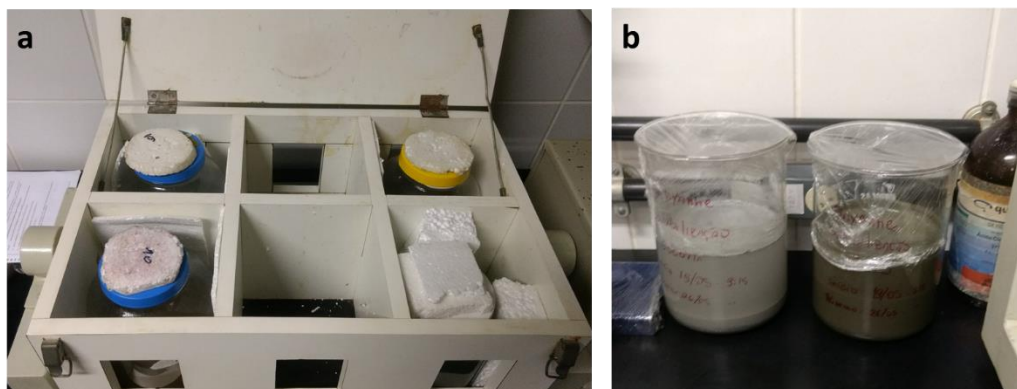
procedimento para preparação das amostras do ensaio de permeabilidade. Para a execução do ensaio e coleta da água que percolada pelo material, foi utilizado o permeâmetro de parede flexível.

Com a coleta do material foi possível obter os valores de concentração de sulfeto e sulfato presente nas amostras, determinar o pH, e por fim, verificar se os materiais presentes estão em concentrações aceitáveis para manuseio.

3.4.4 Ensaio de Lixiviação e Solubilização

Para entender melhor o comportamento químico das amostras devido as concentrações de sulfeto e sulfato foram preparadas as amostras de lixiviado e solubilizado, conforme NBR 10.005:2004 E NBR 10.006:2004, respectivamente, Figura 15.

Figura 15 - Extração do Lixiviado e Solubilizado



a. Extração do lixiviado das Amostras 1 e 2. b. Extração do solubilizado das Amostras 1 e 2.

Fonte: Dados da Pesquisa, (2017)

Segundo a NBR 10.005:2004, a lixiviação pode ser entendida como o “processo para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator”. Neste caso esse processo permitirá entender como é o comportamento dentro das amostras para a formação de elementos sulfetados e sulfatados.

É importante ressaltar que o tempo de extração da solução dos processos é diferente, e como o fator tempo é fundamental na formação de íons, deve-se analisar as concentrações finais em função dessa variável.

3.5 AVALIAÇÃO DA NBR 10.004:2004

Para a análise das concentrações de sulfeto e sulfato presentes nas amostras coletadas no ensaio de coluna, e com os extratos preparados de lixiviado e solubilizado foram adotados os procedimentos propostos pela *Standard Methods for the Examination Water and Wastewater*, de 1999.

A concentração de sulfeto (S^{2-}) presente na amostra será dada através do precipitado do elemento na forma de Sulfeto de Zinco (ZnS). Este material precipitado, (Figura 16) é lavado para retirar eventuais impurezas e na sequência é transferido para um *Erlenmeyer* onde será reduzido com uma solução em excesso de Iodo (I_2) em meio ácido. O iodo excedente será quantificado pela titulação com Tiosulfato de Sódio em presença de amido, constituindo assim uma titulação de retrocesso.

Figura 16 – Procedimento – Concentração de Sulfeto – Precipitado



Fonte: Dados da Pesquisa, (2017)

Para o processo de titulação inicialmente foi adicionado solução de Iodo 0,025N e solução de HCl 6N, com o objetivo de se obter uma solução com coloração amarelo palha, que funciona como uma indicação de iodo em excesso. Na sequência é adicionado amido para condicionar uma coloração azul escura. Por fim, uma solução de Tiosulfato de sódio é adicionada até a viragem do indicador do azul para o incolor, Figura 17.

Figura 17 - Ensaio – Determinação da Concentração de Sulfeto



Fonte: Dados da Pesquisa, (2017)

Devem ser anotados os volumes utilizados para a preparação e processo de titulação das soluções de iodo, Tiossulfato de sódio e o volume inicial da amostra. Dessa forma, a concentração de sulfeto pode ser calculada utilizando a Equação 2, e o resultado obtido em miligramas por litro.

$$\text{mg } S^{2-}/L = \frac{[(A \times 0,025) - (B \times 1,116)] \times 16000}{V_{\text{Amostra}}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde, A é o volume total de solução de iodo gasto e B o volume total de solução de Tiossulfato de sódio gasto, sendo que a cada 1 ml de solução de iodo 0,025N reage com 0,4 mg de S^{2-} .

No caso da análise da concentração dos íons de sulfato (SO_4^{2-}), tem-se que estes podem estar presentes em águas naturais em concentrações que variam de mg a g/L. É importante ressaltar que os resíduos de drenagem de mineração podem contribuir com grandes concentrações de SO_4^{2-} , devido a oxidação da pirita.

Logo, tem-se que a determinação dos íons de SO_4^{2-} , ocorre com a precipitação em meio ácido acético com cloreto de bário ($BaCl_2$) até a formação de cristais de sulfato de bário ($BaSO_4$) de tamanho uniforme. A absorvância dos cristais foi medida com o espectrofotômetro e a concentração de sulfato é determinada pela comparação dos dados obtidos com a curva analítica de calibração, Quadro 8.

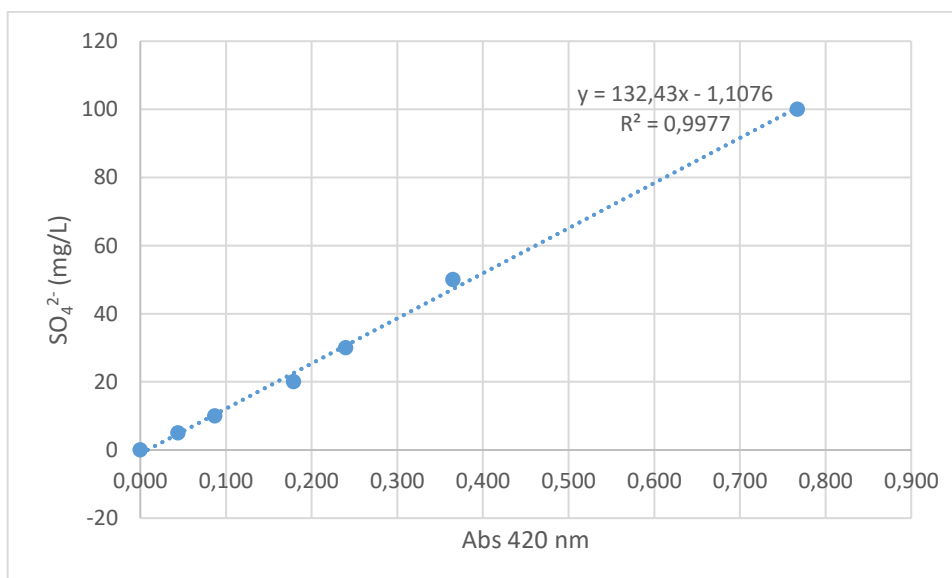
Quadro 8 – Dados da Curva Padrão de Sulfato da Concentração de Sulfato

Ponto	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Água destilada (mL)	Solução Padrão SO ₄ ²⁻ (50 mg/L)	Abs 420 nm
01	0	100	0	0,000
02	5	90	10	0,044
03	10	80	20	0,087
04	20	60	40	0,179
05	30	40	60	0,240
06	50	0	100	0,365
07	100	-	-	0,767

Fonte: Dados da Pesquisa, (2017)

Com base nesses resultados foi possível traçar o Gráfico 1, que foi aplicado como base para obter as concentrações de sulfato das amostras analisadas.

Gráfico 1 - Curva Padrão da Concentração de Sulfato



Fonte: Dados da Pesquisa, (2017)

Logo, para se obter as concentrações de sulfato das amostras analisadas será aplicada a equação da reta obtida no Gráfico 1 dada por $y = 132,43x - 1,107$, onde x equivale as leituras feitas pelo espectrofotômetro que forneceram os valores de absorvância 420 nm e y equivale as concentrações em mg/L de sulfato.

Com base nas concentrações de sulfeto/sulfato obtidas foi possível caracterizar o Resíduo de Mineração segundo a NBR 10.004:2004 em função dessa variável. Para essa análise foi seguido as etapas propostas pela NBR 10.004:2004, página 6.

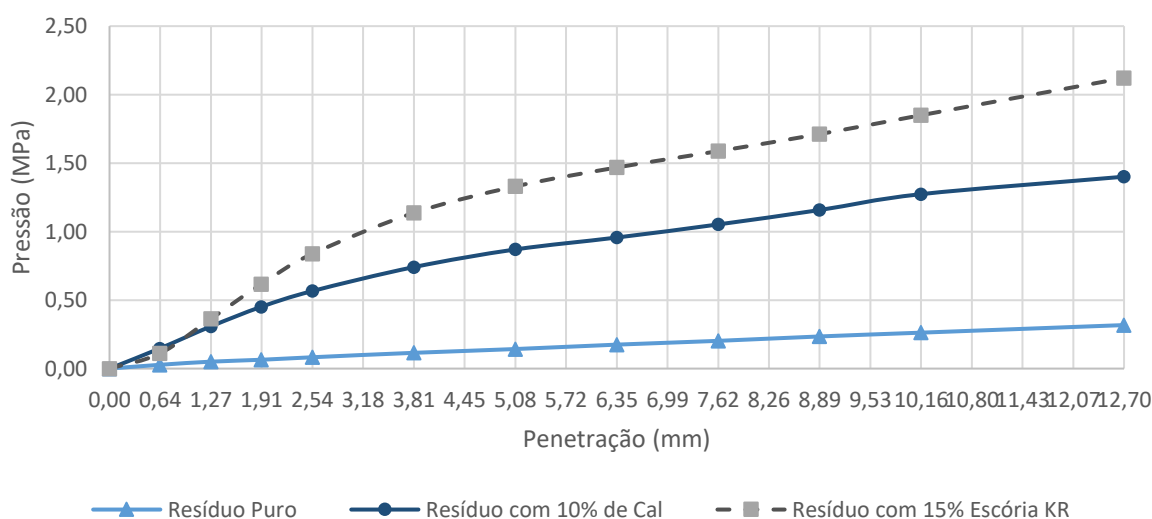
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta a tabulação e discussão de todos os resultados obtidos após os ensaios efetuados e finalizados. Em todas as situações tem-se um comparativo entre esses resultados considerando as amostragens analisadas, que foram do Resíduo de Mineração de ouro com adição de 20%, 30% e 40% de Escória de Dessulfuração (Escória KR). De forma que o objetivo final é verificar as características e comportamento do solo extraído da mineradora de ouro, principalmente sua viabilidade ambiental para ser utilizado em estradas vicinais na própria mina.

4.1 ENSAIOS PRELIMINARES

Seguindo a Norma proposta pelo DNIT, IPR-719, (2006, p. 37), o Índice Suporte Califórnia, foram realizados ensaios e afim de melhorar as características mecânicas do resíduo estudado, de forma a permitir o seu reuso dentro do próprio local de sua produção. Na primeira etapa de estudos, foram feitos os ensaios denominados preliminares, onde se comparou o ganho de capacidade de carga do material, devido a adição de Cal e a Escória de Dessulfuração, Gráfico 2, sendo o material compactado com energia Proctor normal.

Gráfico 2 - Curvas ISC – Ensaios Preliminares



Dados da Pesquisa, (2017)

Assim foi possível calcular o Índice Suporte Califórnia, Tabela 1. Com base nesses resultados se optou por adotar a Escória de Dessulfuração como aditivo para melhoramento do Resíduo de Mineração estudado.

Tabela 1 – Resultados ISC - Ensaios Preliminares

Amostra	Mistura	ISC (%)	w_{ótima} (%)	Expansão (%)
Teste 1	Resíduo de Mineração	1,35	9%	2,64
Teste 2	Resíduo de Mineração + Solução de Cal – Conc. 10%	10,54	10%	1,03
Teste 3	Resíduo de Mineração + 15% Escória de Dessulfuração	16,17	11%	0,95

Dados da Pesquisa, (2017)

Nota-se que o Resíduo de Mineração com substituição de 15% de sua massa pela Escória de Dessulfuração proporcionou um ganho de 11,97 vezes o valor do ISC do resíduo sem aditivos. Além disso, a Escória se mostrou mais vantajosa que a Cal pois provocou uma menor expansão durante o ensaio de ISC.

4.2 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES GEOTÉCNICAS E MECÂNICAS

4.2.1 Caracterização Geotécnica

Para se obter a massa específica das amostras, todos os procedimentos seguiram as diretrizes da NBR 6458:2016. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados - Massa Específica

Amostra	Massa Específica (g/cm³)
Amostra 1	2,89
Amostra 2	3,31
Amostra 3	2,98
Amostra 4	3,04
Amostra 5	3,06

Fonte: Dados da Pesquisa, (2016)

Conforme resultados apresentados na Tabela 2, é possível perceber que o Resíduo de Mineração e a Escória de Dessulfuração possuem uma massa específica relativamente alta. Isso se justifica em função de seu processo de formação. No caso do Resíduo, por ser um material proveniente de uma Mineradora de Ouro, o material possui alta presença de argilominerais o que confere uma massa específica alta, o

que pode ser comprovado se comparado com os valores sugeridos pelo Laboratório de Geotécnica da Universidade Federal do Ceará, (LAGETEC), onde, materiais com presença de ferro e mica apresentam massa específica de 2,75 a 3,00 g/cm³.

Da mesma forma, pode-se verificar que a Escória KR, por ser produto siderúrgico, possui em sua composição Ferro, o que confere uma maior massa específica. Dessa forma ao realizar as misturas, de acordo com o aumento dos percentuais de Escória na massa total da amostra, tem como consequência o aumento da massa específica final desta combinação.

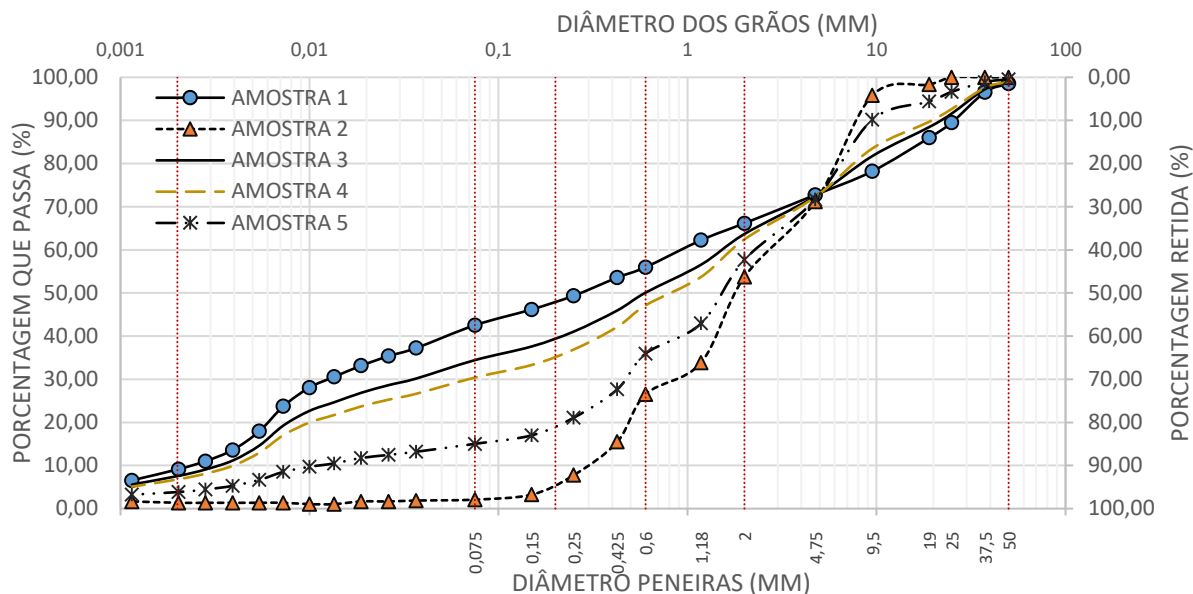
Para o ensaio de granulometria, foram feitas as análises dos materiais predominantes Resíduo de Mineração e da Escória KR individualmente, e depois de analisar os resultados foram feitas as curvas de composição das misturas.

Com base na tabulação dos dados, foi possível encontrar os parâmetros necessários para dizer se o material analisado é bem graduado ou mal graduado. Esses parâmetros são obtidos a partir dos diâmetros D_{10} , D_{30} e D_{60} . Esses dados permitem o cálculo dos coeficientes de curvatura e de uniformidade.

Segundo Knappett e Craig (2014), o diâmetro correspondente a 10% em peso total das partículas é o D_{10} , e, é um valor de extrema importância, pois proporciona as informações necessárias para o cálculo da permeabilidade do solo. No caso dos coeficientes de curvatura um solo será classificado como bem graduado se o coeficiente ficar entre 1 e 3.

Das e Sobhan (2014), definem que solos que apresentam o coeficiente de uniformidade < 5 são denominados uniformes; e com $C_u > 15$ desuniformes. Para valores de C_u entre 5 e 15 são denominados de medianamente uniformes. Assim, foi feito a tabulação dos resultados alcançados e se obteve a curva granulométrica indicada no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Resultados – Curva Granulométrica



Fonte: Dados da Pesquisa, (2016)

Observa-se que análise granulométrica só é relevante na amostra 2, onde se tem os valores dos diâmetros sendo o D_{10} de 0,338 mm, D_{30} de 0,890 mm e D_{60} de 3,375 mm, o que representa um coeficiente de uniformidade de 10 e um coeficiente de curvatura de 0,7, consequentemente, um solo mal graduado de granulometria aberta.

É possível observar que o Resíduo de Mineração apresenta uma certa heterogeneidade em sua composição, apresentando cerca de 33,84% de pedregulho, 23,64% de Areia, 33,37% de Silte e 9,15% de Argila.

Para a obtenção dos limites de consistência do solo, conhecidos como Limites de *Atterberg*, foram utilizadas as Normas NBR 6459:2016 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez e NBR 7180:2016 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade propostas pela ABNT, conforme elencado no Capítulo 3.

Para o caso da Amostra 1 – Resíduo de Mineração, foi possível obter os limites de liquidez e de plasticidade, já a Amostra 2 – Escória KR, esse resultado não foi possível, sendo o solo caracterizado como não plástico e não líquido, o que se confirma por ensaios feitos por Gonçalves, 2016. Nas amostras seguintes, apenas na Amostra 3 foi possível encontrar o limite de liquidez. As outras amostras se comportaram como não líquidas (NL) e não plásticas (NP). O que se justifica já que os teores de Escória KR aumentaram, consequentemente a composição passou a ser menos coesiva. Estes valores estão expressos na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados - Limites de Consistência

Amostra	Material	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Amostra 1	Resíduo de Mineração	27,30	15,40	11,90
Amostra 2	Escória de Dessulfuração	NL	NP	-
Amostra 3	Resíduo com adição de 20% de escória.	31,17	NP	-
Amostra 4	Resíduo com adição de 30% de escória.	NL	NP	-
Amostra 5	Resíduo com adição de 40% de escória.	NL	NP	-

Fonte: Dados da Pesquisa, (2016)

É importante ressaltar que para os cálculos do Limite de Liquidez foi utilizado a equação da reta composta pelos pontos encontrados durante os ensaios de cada uma das amostras. Logo, com os resultados foram feitos os cálculos para se obter o índice de plasticidade.

Das e Sobhan, (2014, p.78), citam em sua obra resultados obtidos por Burmister em 1949, onde o autor classifica o índice de plasticidade de forma qualitativa. Para um material com IP entre 10 – 20, tem-se um material de média plasticidade. No caso da amostra 1, como o IP foi equivalente à 11,90, pode-se dizer que esse material possui de baixa a média plasticidade.

Dessa forma ao consolidar todos os resultados obtidos o solo foi classificado segundo a AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials* e o SUCS – Sistema Unificado de Classificação dos Solos, na qual tem-se a Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação das Amostras

Amostra	LL (%)	IP (%)	(%) Passante				Classificação	
			Nº 4 (4,75mm)	Nº 10 (2mm)	Nº 40 (0,425mm)	Nº 200 (0,075mm)	AASHTO	SUCS
1	27,30	11,90	72,75	66,16	53,57	42,52	A-6 (2)	SC
2	NL	-	71,21	53,72	15,48	2,08	A-1-B (0)	SP
3	31,17	-	72,44	63,67	45,95	34,43	A-2-6 (4)	SM
4	NL	-	72,29	62,43	42,14	30,39	A-2-4 (0)	SM
5	NL	-	71,70	57,70	27,67	15,02	A-1-B (0)	SM

Dados da Pesquisa, (2017)

Sendo que, todas as amostras após serem complementadas com certo percentual de escória passaram a ser enquadradas dentro da classificação da AASHTO como materiais de comportamento de bom a excelente para aplicação em subleito. No caso

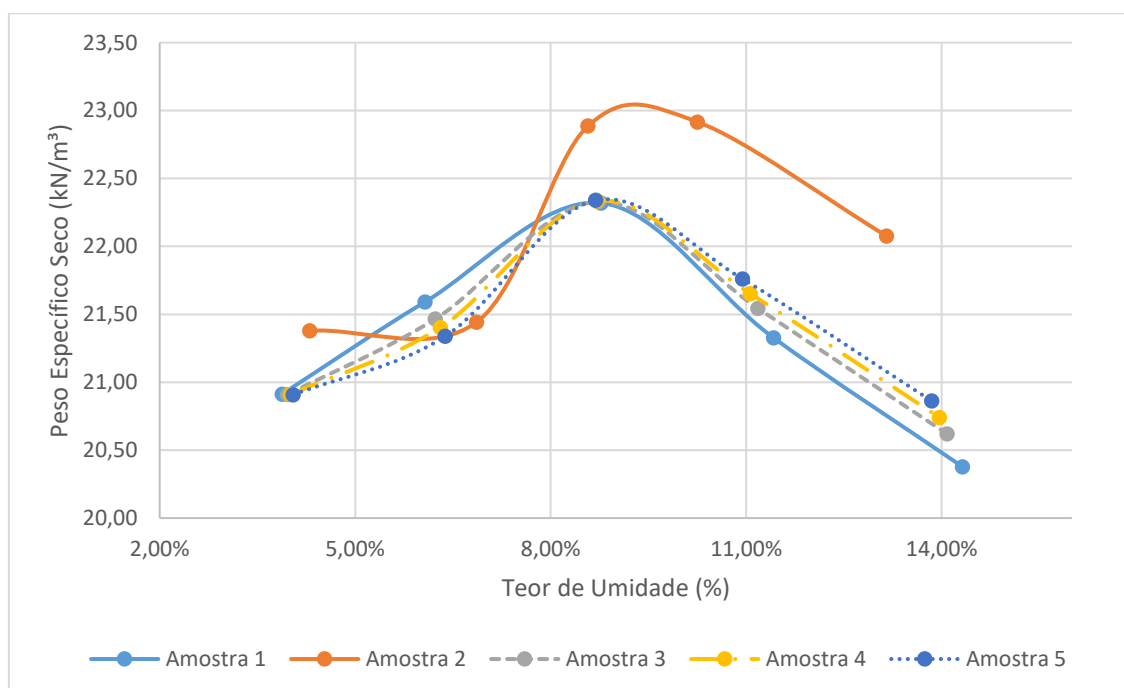
da classificação pelo Sistema Unificado de Classificação, as amostras 4 e 5 passam a se enquadrar como uma Areia Siltosa com Pedregulho.

Os resultados obtidos quando comparados com uma comparação citada por Das e Sobhan, (2016, p. 110), que compara os dois sistemas de classificação tem-se a convalidação dos resultados já que todas as amostras possuem uma comparação entre grupos como dita mais provável.

4.2.2 Compactação

Para a execução dos ensaios de Compressão Axial e Índice Suporte Califórnia, se faz necessário encontrar a umidade ótima, como descrito no Capítulo 3. Dessa forma, após execução e tabulação dos resultados foi possível realizar a confecção no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Curvas de Compactação



A partir do Gráfico 4, pode-se constatar que o Resíduo de Mineração apresenta uma umidade ótima de 9,0% e um peso específico seco máximo de 22,23 kN/m³. Os valores obtidos foram baseados na equação da curva, onde o pico indicou os valores procurados.

4.2.3 Compressão Axial

Para o ensaio de compressão axial as amostras e quantidades foram definidas conforme Quadro 9.

Quadro 9 – Composição das Amostras – Ensaio de Compressão Axial

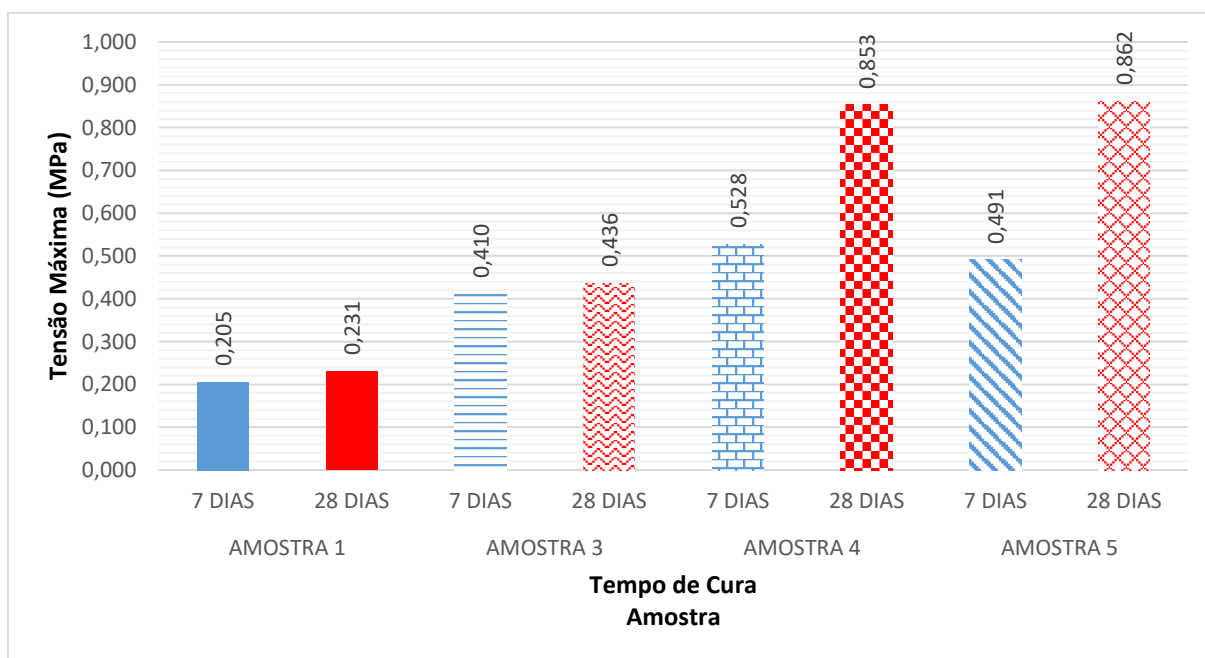
Misturas/Tempo de Cura	7 dias de Cura	Nº de Amostras	28 dias de Cura	Nº de Amostras
Amostra 1	X	3	X	2
Amostra 3	X	3	X	2
Amostra 4	X	3	X	2
Amostra 5	X	3	X	2

Fonte: Dados da Pesquisa, (2016)

Os ensaios para verificar a resistência a compressão axial do material estudado, foram feitos seguindo as diretrizes determinadas na norma rodoviária do DNER-ME 202:1994 e DNER-ME 201:1994.

Além disso os corpos de prova preparados foram analisados em duas etapas. Na primeira etapa foi feita a compressão dos corpos de prova com 7 dias de cura, e a segunda bateria de ensaios foi realizada após 28 dias. Os resultados estão apresentados no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Resultados - Resistência à Compressão Axial



Dados da Pesquisa, (2017)

As amostras com índice 1 representam as amostras antes do ensaio, recém retiradas da câmara úmida após os 28 dias, e as amostras com índice 2 representam as amostras após o ensaio de compressão axial.

É possível verificar que principalmente as amostras c.1 e d.1, que representam os corpos de prova com 30% e 40% de escória adicionada ao Resíduo de Mineração sofreram o que pode ser entendido como uma dilatação, e isso gerou as trincas horizontais nas amostras. Este ensaio foi refeito para verificar se tal aspecto se repetia, e, as novas amostras mantiveram o mesmo comportamento. Mesmo com esse fator, as amostras apresentam um ganho expressivo de resistência ao final dos 28 dias, em média, a resistência aumentou pelo menos 4 vezes.

4.2.4 Permeabilidade

Os corpos de prova utilizados no ensaio de permeabilidade foram compactados com energia modificada em molde cilíndrico com dimensões, e demais características conforme descritas na Tabela 5. O valor da umidade e do grau de saturação são referentes as amostras após o ensaio.

Tabela 5 - Permeabilidade - Dados dos Corpos de Prova

Amostra	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	γ_t (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	e	S (%)
1	10	5,32	22,25	20,46	11,5	0,413	80,3
2	10	5,37	21,37	17,73	23,5	0,866	89,8
3	10	5,28	21,43	19,62	15,4	0,518	88,3
4	10	5,28	21,70	19,62	15,5	0,542	86,6
5	10	5,93	21,39	19,31	16,7	0,584	87,4

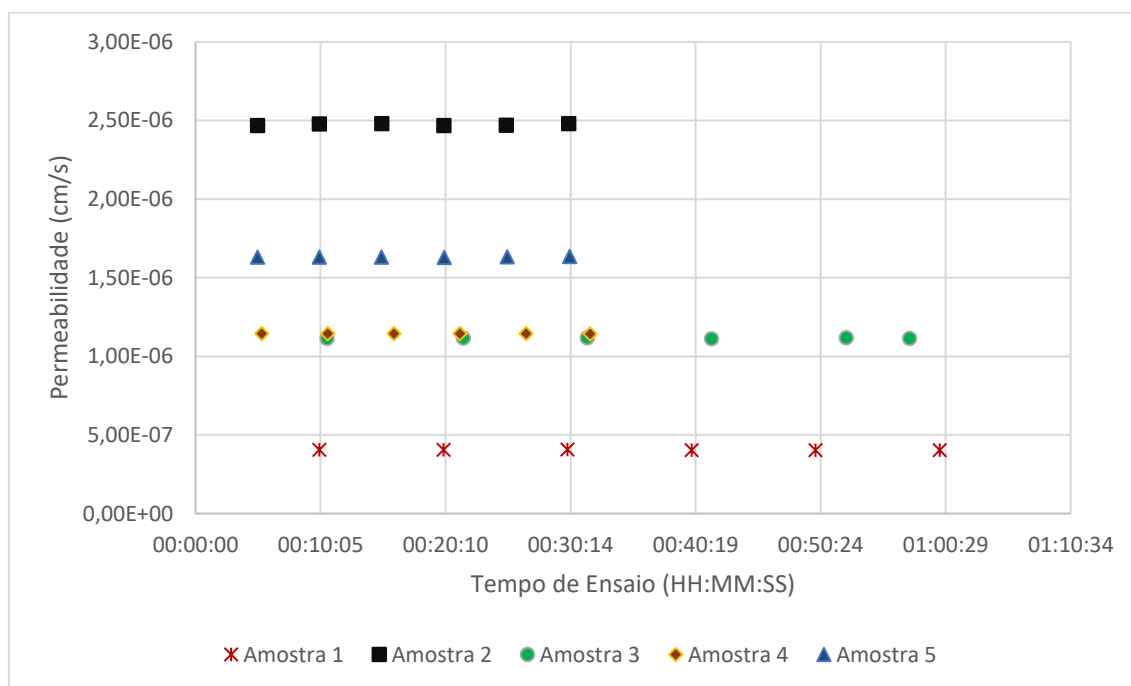
Dados da Pesquisa, (2017)

A primeira etapa executada em todas as mostras foi a percolação de um volume de água maior que o equivalente ao volume de vazios em cada uma das amostras, com o intuito de saturá-las. A pressão confinante aplicada foi de 30 kPa e a contrapressão (pressão de percolação) equivalente a 15 kPa em todos os corpos de prova. O líquido percolado em cada uma das amostras foi coletado para análise química.

Para a medição do coeficiente de condutividade hidráulica foram realizadas leituras até se obter pelo menos 5 pontos em sequência com o mesmo coeficiente de permeabilidade.

É possível notar a equivalência dos resultados, visto que a Amostra 1 (Resíduo de Mineração) e a Amostra 2 (Escória KR) fornecem valores de coeficiente de permeabilidade máximos e mínimos, (Gráfico 6), e os demais resultados encontram-se intermediários a esses resultados. Esses valores eram esperados, visto que as demais amostras eram compostas de misturas entre o Resíduo de Mineração e a Escória KR.

Gráfico 6 - Comparativo Permeabilidade



Dados da Pesquisa, (2017)

Os baixos valores de permeabilidade se justificam pelo fato de que os corpos de provas terem sido moldados apenas com o material passante na peneira de 4,75 mm, e no caso da Amostra 1 (Resíduo de Mineração), existe um percentual considerável de Silte e Argila, conforme apresentado na caracterização granulométrica.

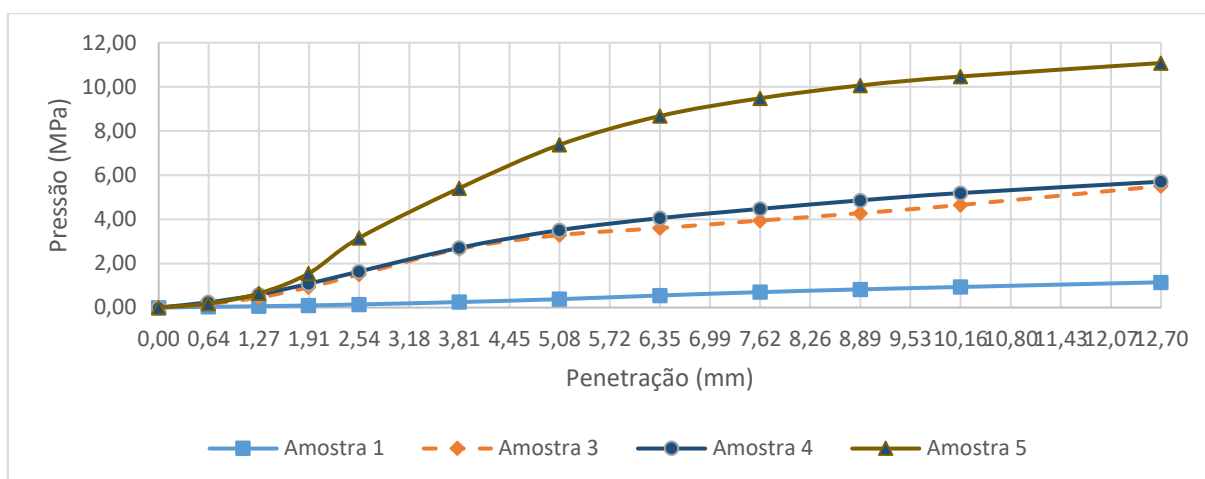
Em todos os casos as amostras podem ser classificadas como material de baixíssima permeabilidade, visto que, são solos com coeficiente de permeabilidade entre 10^{-7} a 10^{-6} cm/s, o que converge com resultados propostos por A. Casagrande e R. E. Fadum, (s.d., *apud* CAPUTO *et al* (2015)).

4.3 AVALIAÇÃO DOS ADITIVOS NA CAPACIDADE DE SUPORTE

Devido ao melhor desempenho apresentado pela mistura do solo com a Escória de Dessulfuração, esse material foi o escolhido para a realização de todos os outros ensaios de caracterização do material. É importante ressaltar que ao utilizar a Escória como aditivo, o estudo passa a relacionar dois resíduos diferentes, um proveniente de uma mineradora de ouro e outro da indústria siderúrgica. Isso em linhas gerais, é um processo altamente sustentável.

A partir desse processo, foram executados os ensaios de ISC para determinação do Índice Suporte Califórnia e Expansão das amostradas detalhadas no Capítulo 3. É importante ressaltar que os ensaios foram feitos apenas para o material puro e suas combinações com a escória. As curvas das médias para os corpos de prova com 96 horas de cura estão indicadas no Gráfico 7.

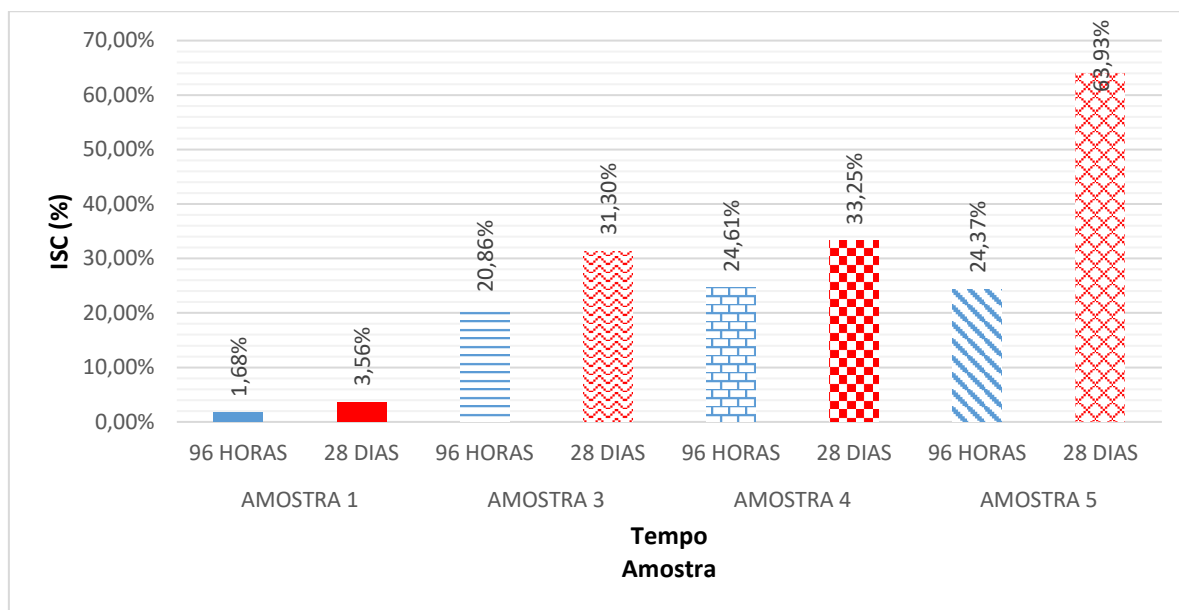
Gráfico 7 - Curvas ISC



Dados da Pesquisa, (2017)

De posse desses resultados, foram determinado os ISC's para as amostras variando pelo período de imersão do material que foi de 96 horas e de 28 dias presentes no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Resumo Resultados - ISC



Dados da Pesquisa, (2017)

No caso do material estudado, sua aplicação será em estradas vicinais, logo em uma análise geral, pode-se afirmar que os percentuais de escória de 20%, 30% e 40%, para as amostras sobre imersão durante 96 horas, geraram um ganho considerável sobre a amostra com apenas o Resíduo de Mineração. Um aumento de quase 14 vezes o valor do ISC para o material puro.

Em contrapartida, os resultados obtidos após 28 dias de imersão do material apresentaram um ganho muito grande para as amostras com 40% de Escória. O ISC que inicialmente era de 1,68% passou para 63,93%. O que se aproxima das especificações propostas pelo manual IPR-719, em parâmetros de ISC, Tabela 6.

Tabela 6 - Comparativo de Resultados x DNIT

Amostra	Tempo	HRB	SUCS	Valores Ref. DNIT ISC HRB	Valores Ref. DNIT ISC SUCS	Valores ISC Amostras
Amostra 1	96 HORAS	A-6 (2)	SC	Menos de 2 a 15	5 a 20	1,68%
Amostra 3	96 HORAS	A-2-6 (4)	SC	12 a 30	5 a 20	20,86%
Amostra 4	96 HORAS	A-2-4 (0)	SM	25 a mais de 80	10 a 40	24,61%
Amostra 5	96 HORAS	A-1-B (0)	SM	20 a mais de 80	10 a 40	24,37%
Amostra 1	28 DIAS	A-6 (2)	SC	Menos de 2 a 15	5 a 20	3,56%
Amostra 3	28 DIAS	A-2-6 (4)	SC	12 a 30	5 a 20	31,30%
Amostra 4	28 DIAS	A-2-4 (0)	SM	25 a mais de 80	10 a 40	33,25%
Amostra 5	28 DIAS	A-1-B (0)	SM	20 a mais de 80	10 a 40	63,93%

Dados da Pesquisa, (2017) X DNIT IPR-719, (2006)

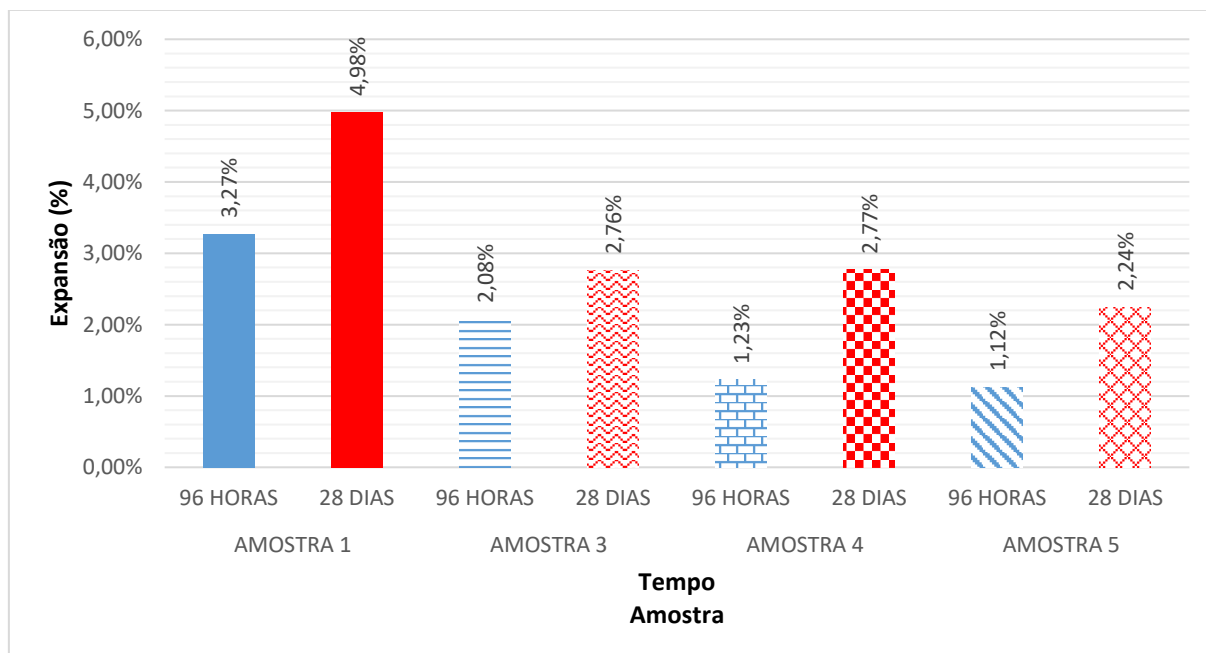
Na Tabela 6 é possível comparar os resultados obtidos com valores de referência propostos pelo Manual de Pavimentação do DNIT, (2006), onde existem valores de referência para o ISC de acordo com a classificação dos solos pelos Sistemas HBR e SUCS.

Nota-se que ao se referenciar ao sistema de classificação SUCS, o Resíduo de Mineração com a presença do coproduto siderúrgico apresenta melhora considerável de capacidade de suporte, principalmente a Amostra 5 que, com 28 dias de cura, apresentou ISC é de 63,93%, superando o ISC de 40% proposto pelo sistema SUCS.

4.3.1 Expansão

Sobre a expansão foram feitas duas verificações distintas. A primeira delas foi através do Ensaio ISC, onde foram feitas as leituras e verificadas as expansões sofridas pelas amostras para os cilindros com 96 horas de submersão e os cilindros com 28 dias de submersão. O Gráfico 9 apresenta um resumo geral do comportamento dessas amostras no decorrer do tempo.

Gráfico 9 – Resultados – Expansão no ISC



Dados da Pesquisa, (2017)

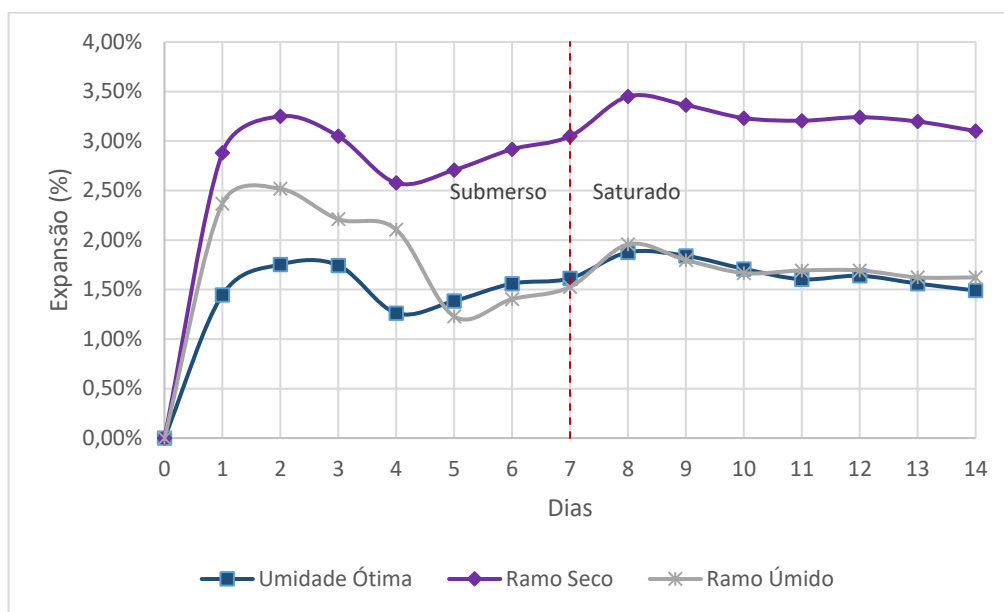
Um dos fatores que mais se destaca nos resultados é a ótima interação entre os dois resíduos. No caso das amostras com o percentual de 40% de Escória em sua

composição, além do ganho de capacidade de carga já mencionado, a expansão para o ensaio padrão de 96 horas obteve uma redução de quase 3 vezes em relação a condição inicial, com resíduo da mineradora de ouro estava sem presença de Escória.

Sendo a expansibilidade deste material um dos principais fatores para sua baixa capacidade de suporte, é possível associar a interação físico-química dos materiais para os ótimos resultados alcançados.

Para convalidar os resultados de expansão obtidos no Ensaio ISC, foi executado também o ensaio pelo Método PTM-130, no qual, foi verificado que o Resíduo de Mineração apresentou em sua umidade ótima uma expansão ao final dos 14 dias de 1,49%, sendo que durante o período de ensaio o resíduo apresentou expansão e retração, Gráfico 10.

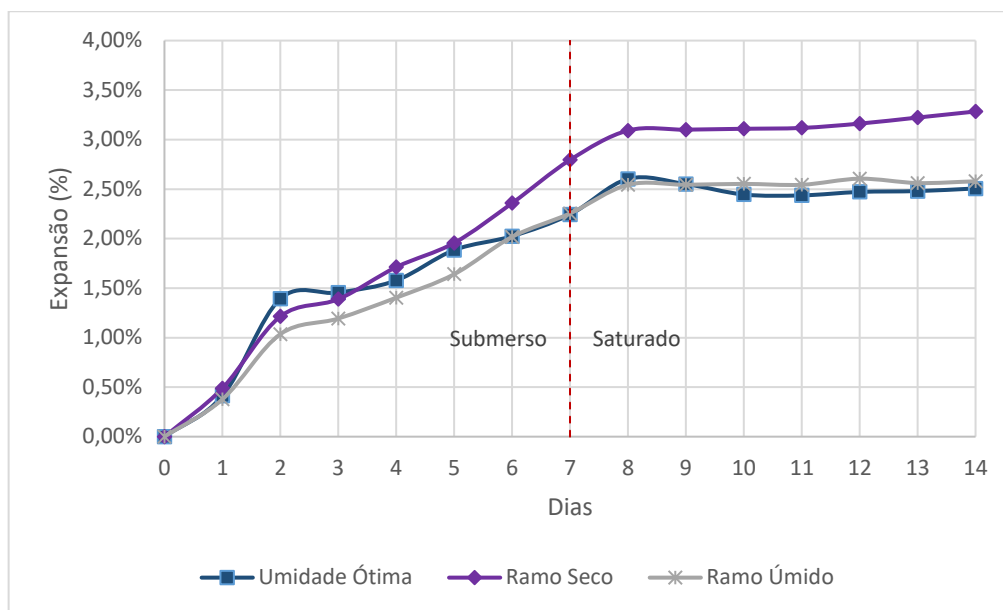
Gráfico 10 - Resultados – PTM-130 - Resíduo de Mineração



Dados da Pesquisa, (2017)

Em linhas gerais, tem-se que o material na umidade ótima foi a condição que apresentou menor expansão acumulada ao final dos 14 dias de ensaio. Comparando com os resultados obtidos no Ensaio ISC, a expansão foi relativamente menor, cerca de metade do valor encontrado no ISC que foi de 3,27%. Também foi realizado o Ensaio PTM-130 com a Escória KR, no qual o material estava seco à umidade higroscópica, Gráfico 11.

Gráfico 11 - Resultados – PTM-130 – Coproduto Siderúrgico



Dados da Pesquisa, (2017)

Semelhante, os resultados do Resíduo de Mineração, a amostra Escória apresentou maior percentual de expansão no ramo seco equivalente à 3,17% e o menor percentual de expansão quando compactado à umidade ótima com expansão de 2,47%, estando abaixo dos 3% determinados por norma PTM-130.

4.4 AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICO

Os ensaios para determinar a composição química da amostra 1 (Resíduo de Mineração) e da amostra 2 (Escória de Dessulfuração), tiveram por objetivo principal verificar a presença de elementos sulfetados ou sulfatados, principalmente na amostra 1 (Resíduo de Mineração), devido a sua origem.

Foram feitas nas amostras uma caracterização básica das amostras com o intuito de se determinar condicionantes como a capacidade de troca de cátions, pH e teor de matéria orgânica, Tabela 7.

Tabela 7 - Análise Química Básica

Determinações			Metodologia	Amostra 1	Amostra 2
P	Resina	mg/dm ³	IAC	53	14
M.O.	Oxidação	g/dm ³	IAC	13	33
COT	Cálculo	g/dm ³	IAC	8	19
pH	CaCl ₂	-	IAC	5,4	12
pH	SMP	-	IAC	7,19	11,94
K	Resina	mmolc/dm ³	IAC	1,6	1,9
Ca	Resina	mmolc/dm ³	IAC	104	53
Mg	Resina	mmolc/dm ³	IAC	116	3
H ⁰ + Al ³	Cálculo	mmolc/dm ³	IAC	12	0
Al ³	KCl	mmolc/dm ³	IAC	0	0
H ⁰	Cálculo	mmolc/dm ³	IAC	12	0
C.T.C	Cálculo	mmolc/dm ³	IAC	233,6	57,9
S.B.	Cálculo	mmolc/dm ³	IAC	221,6	57,9
V%	Cálculo	%	IAC	95	100
m%	Cálculo	%	IAC	0	0
K na C.T.C	Cálculo	%	IAC	0,7	3,3
Ca na C.T.C	Cálculo	&	IAC	44,5	91,5
Mg na C.T.C	Cálculo	%	IAC	49,7	5,2
Al na C.T.C	Cálculo	%	IAC	0	0
H na C.T.C	Cálculo	%	IAC	5,1	0
Ca/K	Cálculo	-	-	65	27,9
Ca/Mg	Cálculo	-	-	0,9	17,7
Mg/K	Cálculo	-	-	72,5	1,6

(*) IAC – Análise química para avaliação da fertilidade em solos tropicais, Instituto Agrônomo de Campinas, 2001.

Dados da Pesquisa, (2017)

Os resultados encontrados em laboratório apresentam para as duas amostras capacidades de trocas de cátions relativamente expressivas com relação aos cátions de Cálcio e Magnésio, o que poderá favorecer a reação entre os dois materiais quando misturados.

Além disso, é possível verificar que o Resíduo de Mineração apresenta um pH mais neutro, equivalente à 7,19. Em contrapartida a Escória possui um pH extremamente básico, equivalente à 11,94, sendo que este valor elevado de pH da Escória se justifica pela grande concentração de óxido de cálcio presente no material, decorrente do processo de refino da gusa.

Com base nos resultados encontrados na caracterização básica, verificou-se a necessidade de se realizar o ensaio FRX. As análises realizadas foram do tipo Semiquantitativas por fluorescência de Raios-X (FRX) com Perda ao Fogo (PF), no qual foram encontrados os elementos da Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados da Análise Química Semiquantitativa - FRX

Amostra 1 – Resíduo de Mineração		Amostra 2 – Escória de Dessulfuração	
Óxidos	(%)	Óxidos	(%)
SiO ₂	46,83	CaO	63,34
Al ₂ O ₃	33,62	SiO ₂	11,95
K ₂ O	4,29	Fe ₂ O ₃	9,97
Fe ₂ O ₃	3,41	Al ₂ O ₃	7,37
MgO	2,59	SO ₃	6,71
SO ₃	1,05	MnO	0,23
CaO	0,76	TiO ₂	0,21
TiO ₂	0,46	SrO	0,20
MnO	0,03	ZrO ₂	0,02
ZrO ₂	0,02	P.F.	N.A.*
ZnO	0,01		
P.F.	6,93		

* N.A. – Não apresentou perda ao fogo.

Dados da Pesquisa, (2017)

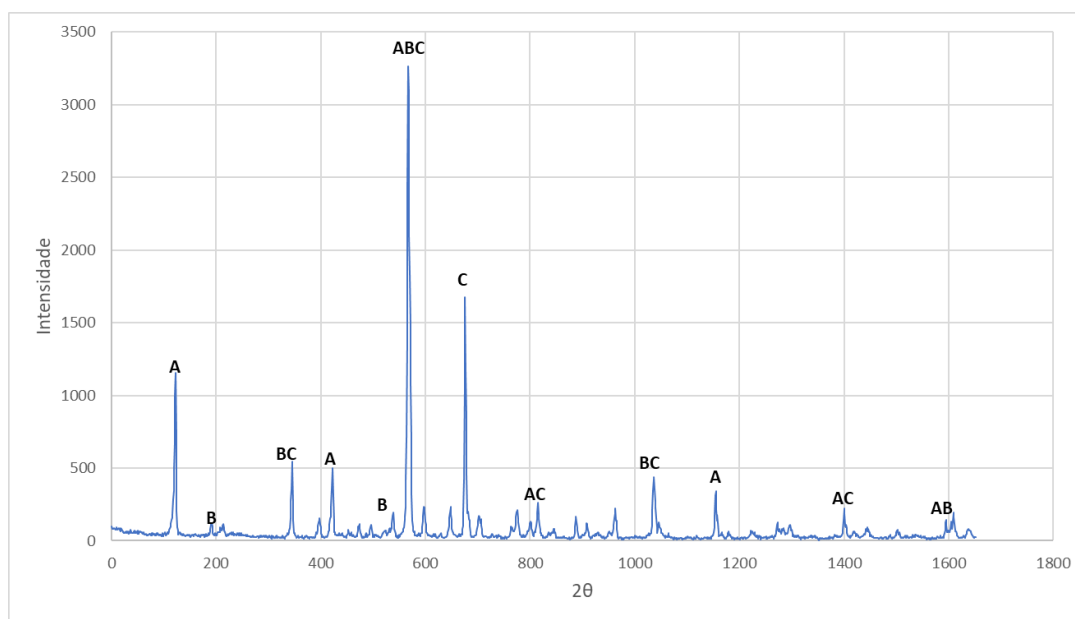
Os resultados comprovam a alta concentração de óxido de cálcio presente na amostra 2, cerca de 60% da composição total. Além disso, a análise permite identificar a presença de óxidos de enxofre nos dois materiais. Sendo que a amostra 1 (Resíduo de Mineração) apresentou uma concentração de 1,05% de SO₃ e a amostra 2 (Escória de dessulfuração) apresentou uma concentração de 6,71%.

Diante disso, foram feitas as análises mineralógicas das amostras, no intuito de se verificar a presença de sulfetos/sulfatos. Os resultados obtidos com base no ensaio de Difração de Raios-X foram de extrema importância, pois, permitiram identificar na mineralogia da Amostra 1 (Resíduo de Mineração) a existência de minerais sulfatados.

Para o cálculo da distância interplanar basal foi utilizada a *Lei de Bragg*. O intervalo de 2 θ utilizado foi de 5.424 a 68.130 para a Amostra 1 e de 4.360 a 64.282, para a amostra 2. As duas amostras permitiram um limite de confiança 32%, sendo que, a amostra 1 apresentou uma correspondência/Total de 48/77 e a amostra 2 uma correspondência/Total de 35/65.

No caso da amostra 1 (Resíduo de Mineração), foram encontrados minerais de **A** – Quartzo (SiO_2), **B** – Sulfato de Sódio Cálcio e Alumínio Hidratado ($\text{NaCa}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{SO}_4)_{1.5}15\text{H}_2\text{O}$) e **C** – Hidróxido de Silicato de Alumínio e Magnésio de Potássio ($\text{K}(\text{Mg}, \text{Al})_{2.04}(\text{Si}_{3.34}\text{Al}_{0.66})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$). De forma que traçando os dados obtidos é possível obter o Gráfico 12, onde são identificados os picos de concentração dos minerais encontrados na amostra.

Gráfico 12 - DRX – Amostra 1 – Resíduo de Mineração

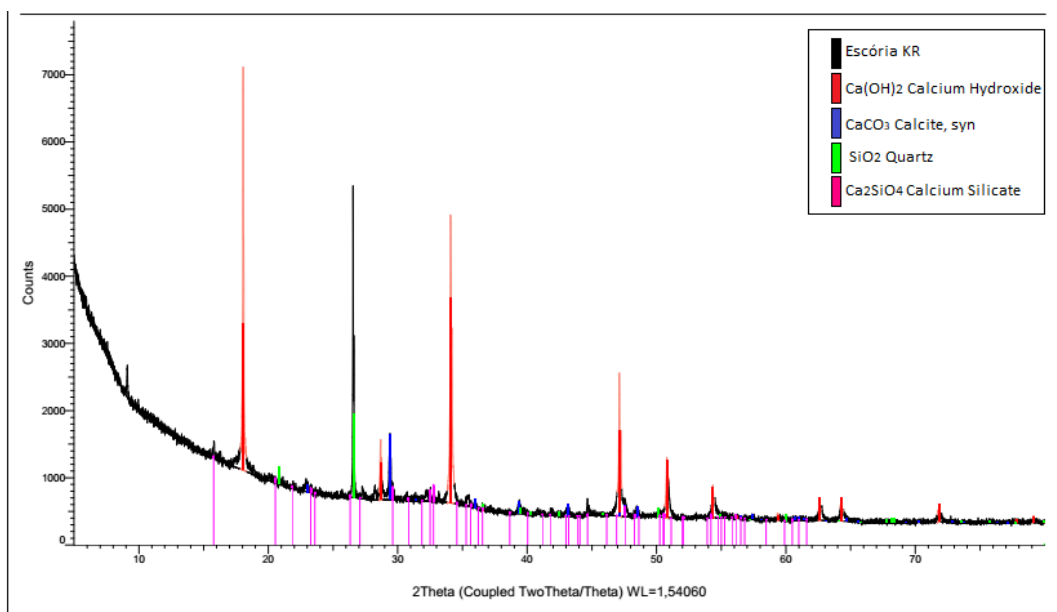


Dados da Pesquisa, (2017)

É importante ressaltar que no Gráfico 12 existem pontos do tipo AB, AC, ABC, isso significa que esses picos são das duas fases, por exemplo, AB estão juntos.

No caso da Amostra 2 (Escória de Dessulfuração), uma análise foi feita pelo LabPetro, Gráfico 13, foram encontrados *Portlandite*, *Calcite*, Quartzo e a Larnite, este último, sendo o mineral associado a fórmula química Ca_2SiO_4 , (MINERALOGICAL SOCIETY OF AMERICA, 2001).

Gráfico 13 - DRX 2 – Amostra 2 – Escória KR



Fonte: LabPetro, (2017)

Após essa caracterização Química e Mineralógica inicial, foram preparadas as amostras com a misturas determinadas nesta pesquisa com o intuito de verificar com base na NBR 10.004:2004 a classificação do material estudo com base nas concentrações de sulfeto/sulfato em função dos lixiviados e solubilizados das amostras. Além disso, foram analisados com base no ensaio de coluna para se verificar o comportamento das concentrações de sulfeto/sulfato após a percolação de água pelo material.

4.4.1 Ensaio de Coluna

O ensaio de coluna foi executado em paralelo ao ensaio de permeabilidade do material, utilizando um permeâmetro de parede flexível. Toda à água coletada durante o processo de saturação das amostras e posteriormente a execução do ensaio de permeabilidade foram coletadas para análise dos percentuais de concentração de sulfeto e sulfato das amostras.

Após realização dos procedimentos descritos no Capítulo 3, foram encontras as concentrações em mg/L (miligrama por litro), das concentrações de sulfeto (S^{2-}) e sulfato (SO_4^{2-}), Tabela 9.

Tabela 9 - Análise Química - Material do Ensaio de Coluna - Concentração de S^{2-} e SO_4^{2-}

Amostra	Material	S^{2-} (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)
Amostra 1	Resíduo de Mineração	12,32	9180
Amostra 2	Escória de Dessulfuração	68,84	28
Amostra 3	Resíduo + 20% Escória de Dessulfuração	129,64	1918
Amostra 4	Resíduo + 30% Escória de Dessulfuração	159,82	2560
Amostra 5	Resíduo + 40% Escória de Dessulfuração	159,82	3143

Dados da Pesquisa, (2017)






Estes resultados mostram que as amostras que contêm a mistura entre o Resíduo de Mineração e a escória de dessulfuração apresentaram um aumento na concentração de S^{2-} e uma redução na concentração de SO_4^{2-} . Cabe ressaltar que os resultados estão em escalas diferentes, visto que para a execução dos ensaios houve a necessidade de se adotar volumes diferentes de solução.

Assim, sendo a equação química geral de transformação constante de equilíbrio destes compostos a relação da seguinte reação:



Sendo a reação que ocorre da esquerda para a direita, ou seja, para a formação de sulfato é dada pela oxidação da reação, e a reação que ocorre da direita para a esquerda, é uma reação de redução e confere a formação final de sulfeto. O que pode ser verificado, é que para as amostras com pH elevado, Tabela 10, é possível identificar maior concentração dos íons de S^{2-} .

Tabela 10 - pH das Amostras – Ensaio de Coluna

Amostra	Material	pH	Indicador
Amostra 1	Resíduo de Mineração	7	
Amostra 2	Escória de Dessulfuração	12	
Amostra 3	Resíduo + 20% Escória de Dessulfuração	12	
Amostra 4	Resíduo + 30% Escória de Dessulfuração	12	
Amostra 5	Resíduo + 40% Escória de Dessulfuração	12	

Dados da Pesquisa, (2017)

Essa verificação é mais difícil de acontecer para os sais de SO_4^{2-} , já que em pH elevado faz com que os sais de SO_4^{2-} estejam menos solúveis. Amostra pura de escória apresenta um pH alto, o que dificulta a precipitação dos sais de sulfato, e

dessa forma, tem-se uma concentração maior de sulfeto. Na amostra do Resíduo de Mineração, o efeito é o contrário, o que se justifica pelo seu pH mais neutro.

Como o pH das amostras com mistura entre o Resíduo de Mineração e escória de dessulfuração tiveram seu pH próximo a 12, fica evidente o fato das concentrações de sulfeto aumentarem e as de sulfato diminuírem.

4.4.2 Ensaio de Lixiviação e Solubilização

Em paralelo ao ensaio de coluna foram preparadas as soluções dos ensaios de Lixiviação e Solubilização, conforme NBR 10.005:2004 E NBR 10.006:2004, respectivamente. O intuito da preparação das amostras era verificar as concentrações de sulfeto e sulfato das amostras de Resíduo de Mineração e da escória de dessulfuração, para avaliar sua classificação nesse requisito conforme NBR 10.004:2004. Com base nos procedimentos descritos no Capítulo 3, foram encontrados os seguintes percentuais de concentração dos compostos, Tabela 11.

Tabela 11 - Lixiviado e Solubilizado - Concentração de Sulfeto e Sulfato

Amostra	Material	S ²⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
Solubilizado I	Resíduo de Mineração	0,00	3023,62
Solubilizado II	Escória de Dessulfuração	47,86	25,78
Lixiviado I	Resíduo de Mineração	0,00	1262,30
Lixiviado II	Escória de Dessulfuração	50,98	13,06

Dados da Pesquisa, (2017)

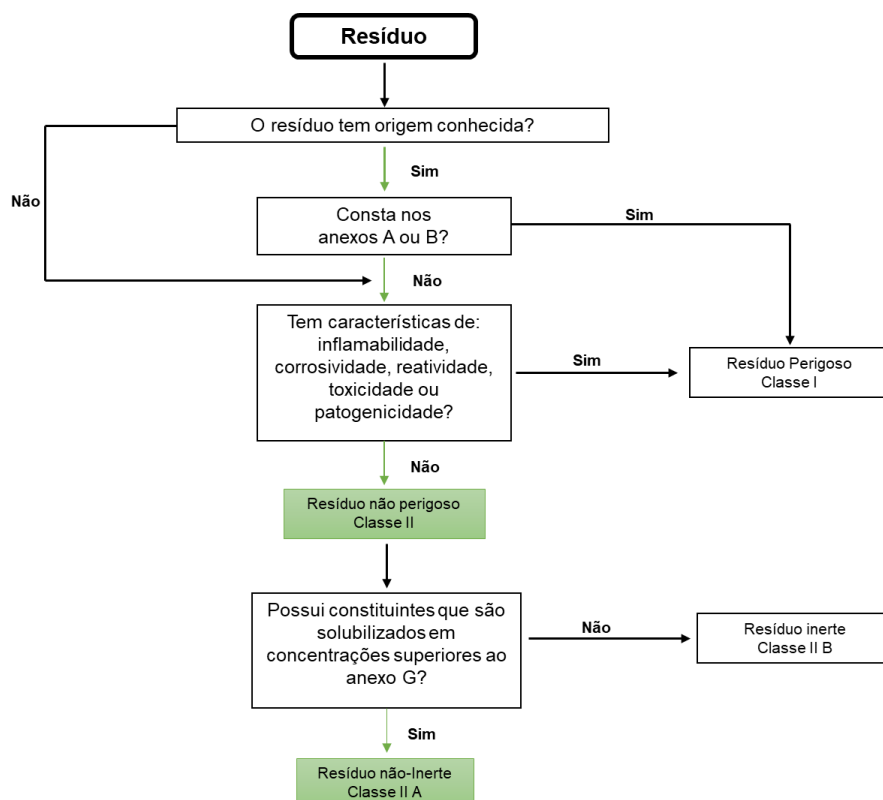
É possível notar uma concentração elevada nos percentuais de sulfeto na amostra de Escória de Dessulfuração e percentuais mais consideráveis de sulfato na amostra do Resíduo de Mineração. Esses valores confrontados com os percentuais encontrados no fluido proveniente do Ensaio de Coluna mostram uma redução nas concentrações de sulfeto e sulfato, para as amostras puras de Resíduo de Mineração e Escória, o que provavelmente proporcionará uma redução nas concentrações das misturas.

É importante ressaltar que tanto as amostras coletadas durante o ensaio de coluna, como as amostras preparadas para análise do lixiviado e solubilizado, foram identificadas apenas as concentrações de sulfato dissolvido. O fato das amostras terem sido filtradas previamente faz com que possíveis elementos precipitados tenham ficado retidos e conseqüentemente não foram analisados.

4.5 AVALIAÇÃO DA NBR 10.004:2004

A NBR 10.004:2004 classifica os resíduos em duas classes, a Classe I – Resíduos Perigosos e a Classe II – Resíduos Não perigosos, sendo que esta se subdivide em Resíduos Classe II A – Não inertes e Resíduos Classe II B – Inertes, para analisar diversos tipos de componentes químicos. Para classificar o Resíduo de Mineração, devido a sua origem a pesquisa se restringiu em analisar as concentrações de sulfeto/sulfato, seguindo as etapas propostas pela NBR 10.0004:2004, página 6, Figura 19.

Figura 19 - Caracterização e Classificação de Resíduos Conforme NBR 10.004:2004



Fonte: Adaptado NBR 10.004 (2004)

Dessa forma tem-se que o Resíduo de Mineração apresenta em sua amostra solubilizada concentrações maiores que 250 mg/L Sulfato (expresso em SO_4), o que permite classificá-lo como um Resíduo Não Perigoso e Não Inerte Classe II A, nesse requisito.

Para a Escória de Dessulfuração também foram utilizados os resultados fornecidos pela empresa Arcelor, citados por Gonçalves, (2016), no qual segundo o autor, tanto os extratos solubilizados quanto os lixiviados apresentaram as concentrações

máximas permitidas segundo anexos F e G da NBR 10.004:2004. No caso da escória, o extrato solubilizado apresentou Índices de Fenóis maiores que o permitido na norma, o que permitiu classificar a Escória de Dessulfuração também como um Resíduo Não Perigoso e Não Inerte Classe II A.

5 CONCLUSÕES

Após análise dos resultados entre a incorporação físico-químico do Resíduo de Mineração com a Escória de Dessulfuração foi possível concluir que o coproduto siderúrgico proporcionou melhora às características mecânicas ao Resíduo de Mineração. De forma que, para chegar a tais conclusões a pesquisa caracterizou e analisou as propriedades físico-químico do resíduo puro e posteriormente, sua incorporação com a escória de Dessulfuração, a fim de se obter um produto final viável tecnicamente e ambientalmente para aplicação em estradas vicinais.

Inicialmente foi feito o estudo bibliográfico dos itens pertinentes ao tema, onde verificou-se que materiais provenientes da mineração de ouro são materiais extremamente expansivos, devido à presença de íons de sulfeto/sulfato em sua composição química. Logo, foram analisadas as propriedades geotécnicas, mecânicas e químicas, do resíduo puro e posteriormente analisar sua incorporação à Escória de Dessulfuração.

Analisando geotecnicamente o resíduo da mineração de ouro constatou que o material era heterogêneo granulometricamente, sendo classificado pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos como uma areia argilosa com pedregulho e pelo sistema HRB como um solo A-6 (2). O material apresentou um ISC de 1,68%, com expansão de 3,27% e uma resistência a compressão axial equivalente à 0,205 MPa, ou seja, um material inviável em termos de propriedades mecânicas para a pavimentação.

Em contrapartida, o material apresentou permeabilidade de $4,044 \times 10^{-7}$ cm/s, sendo caracterizado como material de baixíssima permeabilidade, o que é uma propriedade para aterros.

Quimicamente quanto as concentrações sulfeto/sulfato das amostras de lixiviado e solubilizado do resíduo mineração, pode-se verificar que estas estavam dentro dos limites estipulados pela NBR 10.004:2004 para esse requisito, de forma a caracterizar o material como não perigoso, em termos de concentrações de sulfeto e sulfato.

As propriedades mecânicas da mistura entre os resíduos (Resíduo da Mineração de Ouro e a Escória de Dessulfuração), apresentaram excelentes resultados para como componentes de pavimentação para aplicação em uma estrada vicinal, principalmente para as amostras com incorporação de 40% de Escória, a qual apresentou:

- Melhora na composição granulométrica, de forma que a amostra que antes era classificada pela AASHTO com uma avaliação subgraduada ruim, passou a ser classificada com uma avaliação subgraduada excelente, sendo enquadrada dentro da classificação da AASHTO como material de comportamento de bom a excelente para aplicação em subleito.
- O Índice Suporte Califórnia médio da amostra com 40% de Escória apresentou um ganho inicial com 96 horas de 14,50 vezes o valor do ISC do resíduo puro. E devido as propriedades cimentícias da escória essa capacidade de suporte aumentou expressivamente ao final de 28 dias, proporcionando um ISC de 63,93%.
- A expansão do material incorporado a escória também apresentou redução. O Resíduo de Mineração que ao final de 28 dias apresentou uma expansão equivalente à 4,98%. Ao ser incorporado à Escória passou a apresentar uma expansão de apenas 2,24%.
- A resistência à compressão axial também apresentou ganhos com a incorporação entre os materiais. Os corpos de prova com 30% e 40% de escória adicionada, que mesmo apresentando uma dilatação durante o processo de cura, tiveram um ganho expressivo de resistência ao final dos 28 dias, onde, em média, a resistência aumentou pelo menos 4 vezes.
- Sobre a permeabilidade do resíduo adicionado a escória, em todas as porcentagens analisadas o material continuou apresentando baixíssima permeabilidade, na casa de 10^{-6} cm/s, o que é excelente, pois esse material passa a ser uma alternativa de aplicação em situações onde se busca impedir o fluxo de contaminantes, como por exemplo em um aterro.
- Quanto ao comportamento químico das amostras com relação as concentrações de sulfeto/sulfato a análise do fluído coletado durante o ensaio de Coluna e a análise do lixiviado e solubilizado das amostras isoladas, preparados segundo normas, mostraram que tanto o Resíduo de Mineração, quanto a escória de dessulfuração e suas incorporações apresentaram uma classificação final como um Resíduo Não Perigoso e Não Inerte Classe II A, segundo as concentrações de sulfeto/sulfato. Além disso, ao se analisar a composição química isolada dos materiais não são identificados nenhum

elemento químico perigoso. Assim tem-se a comprovação da viabilidade ambiental desses materiais para sua utilização.

Com base em todos esses resultados é evidente que a incorporação físico-químico do Resíduo proveniente da mineração de ouro com a Escória de Dessulfuração foi excelente, tanto no aspecto mecânico, quanto no químico. De forma a proporcionar um produto viável para aplicação em obras de engenharia, como estradas de pequeno porte e estradas vicinais. Proporcionando um reaproveitamento de resíduos, que antes eram apenas descartados no meio ambiente.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido à importância do reaproveitamento de resíduos sólidos, são apresentadas como sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar da incorporação dos materiais agregados a uma melhora em sua composição granulométrica, de forma a produzir um material totalmente eficaz para aplicação na pavimentação rodoviária;
- Verificar a incorporação dos materiais em outras porcentagens afim de verificar qual a que proporcionará os melhores resultados;
- Avaliar a aplicação do resíduo em outras obras de engenharia, como aterros sanitários, tijolos ecológicos, etc.
- Examinar a incorporação do resíduo com outros materiais, afim de obter outras alternativas de melhoramento e estabilização.

REFERÊNCIAS

ABM, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, **Gestão de Coprodutos: Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico**, (Nota Técnica), Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília, 2008.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 6458: Solo – Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica, da Massa Específica Aparente e da Absorção de Água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

_____. **NBR 10004 – Resíduos sólidos – Classificação**, Rio de Janeiro, ABNT, 2004.

_____. **NBR 10005 – Procedimento para Obtenção de Extrato Lixiviado de Resíduos Sólidos**, Rio de Janeiro, ABNT, 2004.

_____. **NBR 10006 – Procedimento para Obtenção de Extrato Solubilizado de Resíduos Sólidos**, Rio de Janeiro, ABNT, 2004.

_____. **NBR 12023 – Solo-cimento – Ensaio de Compactação**, Rio de Janeiro, ABNT, 1992.

_____. **NBR 12023 – Solo-cimento – Ensaio de Compactação**, Rio de Janeiro, ABNT, 2012.

_____. **NBR 12025: Solo-Cimento, Ensaio de Compressão Simples de Corpos de Prova Cilíndricos – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ACOBRAIL, Instituto Aço Brasil, **Processo Siderúrgico e Produtos**, 2015, <Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site2015/processo.html>>, Acesso: 10 de julho de 2017.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, **Standard Methods for the Examination Water and Wastewater, Sulfide and Sulfate**, American Water Works Association, Water Environment Federation, 1999.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **D5084: Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter**, (2010).

AL-SWAIDANI, Aref, *et al*, **Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil**, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering, Arab International University, Damascus, Syria, 2016. <Disponível em: http://ac.els-cdn.com/S1674775516300543/1-s2.0-S1674775516300543-main.pdf?_tid=7f0bdca0-8c2d-11e7-8b76-00000aab0f27&acdnat=1503951449_07059075c747899c4f673917f656ebdd>, Acesso: 28 de agosto de 2017.

AZÊVEDO, André Luís C. de. **Estabilização de Solos com Adição de Cal. Um Estudo a Respeito da Reversibilidade das Reações que Acontecem no Solo Após a Adição de Cal**, Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2010. <Disponível em: http://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/andre-cairo.pdf> Acesso: 12 de outubro de 2015.

AZZAM, Waseim Ragab, **Utilization of polymer stabilization for improvement of clay microstructures**, Structural Eng. Dept., Faculty of Engineering, Tanta University, Tanta, Egypt, Applied Clay Science, 2014. <http://ac.els-cdn.com/S0169131714000842/1-s2.0-S0169131714000842-main.pdf?_tid=d312cb28-e9f5-11e5-89ff-00000aacb360&acdnat=1457967952_9e277097aa2e57f459f9ebfe03148551> Acesso: 13 de janeiro de 2016.

BARBOSA, Marina Renó, **Caracterização Geoambiental da Escória de Aciaria de Cinco Estados Brasileiros**, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 2013.

BUBACK, Jociléia Alves, **Caracterização Físico-Química-Mineralógica e Micromorfológica de um Perfil de Alteração de Rocha Alcalina do Rio de Janeiro**, Programa de Pós Graduação, Departamento de Engenharia Civil, PUC – RJ, 2008. <Disponível em: http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=12148@1> Acesso: 26 de Fevereiro de 2016.

CAPUTO, Homero Pinto. CAPUTO, Armando Negreiros. ROGRIGUES, J. Martinho de A. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações, Volume 1: Fundamentos**. 7ª Edição – Rio de Janeiro, LTC, 2015.

CCABRASIL, Centro de Coprodutos Aço Brasil, **Coprodutos**, 2017, <Disponível em: http://www.ccabrasil.org.br/Coproducto_ProcessoSiderurgico.asp>, Acesso: 10 de julho de 2017.

CETEM, **Mina de ouro em Paracatu (MG) gera controvérsia por fazer mineração de ouro associada ao arsênio**, Revista Brasil Mineral, 10ª Edição, 2012. <Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/rio20/galerias/2010/Paracatu.pdf>> Acesso: 13 de Janeiro de 2016.

CHIOSSI, Nivaldo, **Geologia de Engenharia**, 3ª ed. São Paulo, Oficina de Textos, 2013.

CONAMA, RESOLUÇÃO CONAMA nº 313, **Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais.**, de 22 de novembro de 2002.

CONCHA, Luís Marcial Collarte, **Estudo da Fadiga de Duas Misturas de Solo-cimento**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1986. <Disponível em: <file:///C:/Users/Day/Downloads/Luis%20Marcial%20Collarte%20Concha.pdf>> Acesso: 10 de Fevereiro de 2016.

CORRÊA, Juliana Francisca, **Avaliação das Melhorias das Propriedades Físicas e Mecânicas de Solos Originados de Rochas Sedimentares pela Adição de Cal**

para Fins de Pavimentação, Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Agosto de 2008.

DAS, Braja M., SOBHAN, Khaled, **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. Tradução da 8ª Edição Norte Americana.

DELGADO, Anna Karina Chaves, **Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Tropicais Característicos do Distrito Federal para Uso na Pavimentação Rodoviária**, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2007.

DEMUELENAERE, Rafael Gerard de Almeida, **Caracterização de Propriedades de Transporte de metais Pesados em Solos Residuais do Rio de Janeiro**, Programa de Pós-Graduação, Departamento de Engenharia Civil, PUC – RJ, 2004. <Disponível em: http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=5462@1&msg=28#> Acesso: 24 de Março de 2016.

DNIT 049:2014 – ME, Solos – **Determinação do índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio**, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2014. <Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/download/convenios-chamamento-publico/revisao-norma-dnit-049-2014-me-v.31out.pdf>> Acesso: 10 de Dezembro de 2015.

DNIT IPR-719, **Manual de Pavimentação**, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 3ª Edição, Rio de Janeiro, 2006.

ESPINOZA, Liset Hurtado, **Avaliação do Potencial de Liquefação de Solos Coluvionares do Rio de Janeiro**, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, 2010. <Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/17520/17520_5.PDF> Acesso: 18 de Janeiro de 2017.

FERNANDES, Daniel Pinto, **Estudo da Estabilização Química, Geo-Mecânica e Ambiental das Escórias de Aciaria LD para Fins de Aplicação como Material de Lastro Ferroviário em Vias Sinalizadas**, Dissertação de Mestrado, Área de Concentração: Geotecnia de Pavimentos, UFOP, Ouro Preto, 2010. <Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2325/1/DISSERTA%C3%87%C3>

%83O_EstudoEstabiliza%C3%A7%C3%A3oQu%C3%ADmica.pdf>, Acesso: 10 de maio de 2017.

GERDAU, **Meio Ambiente e Responsabilidade Social: Coprodutos**, 2017. <Disponível em: <https://www.gerdau.com/pt/meio-ambiente-e-responsabilidade-social/meio-ambiente/co-produtos>>, Acesso: 10 de maio de 2017.

GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

GONÇALVES, Raphael de Martin, **INCORPORAÇÃO de Coproduto de Aciaria Kr e Polímero PDC em Solos para Base de Pavimentos**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

HENDERSON, R. D., **Paracatu Mine Technical Report, Kinross**, Paracatu, Minas Gerais, Brasil, 2006. <Disponível em: <http://fb.kinross.com/pdf/operations/Technical-Report-Paracatu.pdf>> Acesso: 10 de julho de 2017.

IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração, **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração**, Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: 2016. <Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>>, Acesso: 10 de julho de 2017.

KIRMSE, Odair José, **Estudo do Comportamento Metalúrgico do “Reator Kambara” Através de Modelagem Física**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Abril de 2006.

KNAPPETT, J. A., CRAIG, R.F.; **Craig Mecânica dos Solos, Tradução Amir Elias Abdalla Kurban**, 8ª Edição, Rio de Janeiro. LTC, 2014.

KOTZ John C., *et al.*, **Química Geral e Reações Químicas**, Volume 1, Tradução Noveritis do Brasil. Tradução da 9ª edição norte-americana, revisores técnicos Eduardo Codaro e Heloisa Acciari. São Paulo: Cengage Learning, 2015.

LAGETEC, **Determinação da Densidade Real em Solos**, Laboratório de Geotécnica, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, 2016. <Disponível em: <http://www.lagetec.ufc.br/wp-content/uploads/2016/03/Determina%C3%A7%C3%A3o-da-densidade-real-em-solos.pdf>>, Acesso: 29 de Maio de 2017.

LEMOS, Leandro Rocha, *et al.* **Aumento da Eficiência de Dessulfuração do Gusa Líquido em um Reator Kanbara**, *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, V. 8, n. 1, p. 31-36, 2011.

LOVATO, Rodrigo S., **Estudo do Comportamento Mecânico de um Solo Laterítico Estabilizado com Cal Aplicado à Pavimentação**, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

LOZANO, Fernando Arturo Erazo, **Seleção de Locais para Barragens de Rejeitos Utilizando o Método de Análise Hierárquica**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.

MACHADO, Fábio Braz, **Museu de Minerais e Rochas “Heinz Ebert”**, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Departamento de Petrologia e Metalogenia, Unesp, 2000. <Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/museudpm/entrar.html>>, Acesso: 21 de Janeiro de 2016.

MARANGON, Márcio, **Mecânica dos Solos II – Resistência aos Cisalhamento do Solo**, Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Transportes, Versão 2013. [p. 108 – 146].

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira, **Notas de Aula da Disciplina de Pavimentação, Faculdade de Engenharia**, Universidade Federal de Juiz de Fora, Campus Universitário, Juiz de Fora, 2006.

MARTINS, Elaine Arantes Jardim, **Síntese e Caracterização de Sulfetos Metálicos em Baixas Temperaturas por Reação Sólido-Sólido Utilizando-se Gerador de Sulfeto**, Tese Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais, IPEN, São Paulo, 2002.

Mineralogical Society of America, **Handbook of Mineralogy – Larnite, 2001**. <Disponível em: <http://www.handbookofmineralogy.org/pdfs/larnite.pdf> >, Acesso: 10 de agosto de 2017.

NATIONAL LIME ASSOCIATION (NLA), **Technical Memorandum Guidelines for Stabilization of Soils Containing Sulfates**. Austin White Lime, Chemical Lime, Texas Lime. <Disponível em: http://lime.org/documents/publications/free_downloads/technical-memorandum.pdf >, Acesso: 15 de Janeiro de 2016.

NÓBREGA, Maria Teresa de. **Contribuição ao Estudo da Estabilização de Solos Tropicais com Adição de Cal para Fins Rodoviários, Aspectos Mineralógicos e Morfológicos de Alguns Solos das Regiões Sul e Sudeste do Brasil**, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociência, 1988. <Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44131/tde-22062015-101204/pt-br.php>>, Acesso: 15 de Janeiro de 2016.

OLIVEIRA, Antônio Manoel dos Santos; BRITO, Sérgio Nertan Alves de. **Geologia de Engenharia**, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo, 1998.

OLIVEIRA, Rodrigo Fidelis Viana de. **Análise de dois Solos Modificados com Cimento para Dimensionamento de Pavimentos**, Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2011. Disponível em: <http://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/rodrigo-oliveira.pdf> Acesso em: 31 de maio de 2017.

OLIVEIRA, Edgar Adrian de. **Confiabilidade metrológica na determinação de espécies químicas em materiais siderúrgicos por espectrometria de fluorescência de raios-X**. Programa de Pós-Graduação em Metrologia do Centro Técnico Científico da PUC-Rio., PUC – RJ, 2011. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/18799/18799_1.PDF> Acesso em: 31 de maio de 2017.

PEDROSA, Rogério Antonio Alves, **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica do Uso de Agregados de Escória de Aciaria em Concreto Betuminoso Usinado a Quente**, Dissertação de Mestrado, Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, UFOP, Ouro Preto, 2010. <Disponível em: http://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/rogerio-pedrosa.pdf>, Acesso: 20 de julho de 2017.

PINTO, Carlos de Souza, **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

QUEIROGA, Glaucia Nascimento, **A Seção Sedimentar Sulfetada do Ofiolito de Ribeirão da Folha e seu Potencial Metalogenético, Orógeno Araçuaí, MG**, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 2006.

RESCHKE, Juliana Soares, **Escória Granulada de Fundição Utilizada como Substituição ao Cimentos em Concretos: Avaliação de Propriedades Relacionadas com a Durabilidade**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. <Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4481/000457136.pdf?...1>> Acesso: 27 de julho de 2017.

RIZZO, Ernandes Marcos da Silveira Rizzo, **Introdução aos Processos de Refino Primário dos Aços nos Convertedores de Oxigênio**, Série: Capacitação Técnica em Processos Siderúrgicos, Área: Aciaria, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2006.

SHERWOOD, P., **Effect of sulfates on cement- and lime-stabilized soils**. Highw. Res, 1962. Board Bull. (353), 98–10

SILVA, Alexandre Paiva da, **Relações Massa/Volume – Atributos Físicos e Químicos do Solo**, Notas de Aula, UFCG. s.d.

SILVA, Marcos Antônio da., **Avaliação da utilização de agentes dessulfurantes a base de carbureto de cálcio contendo sodalita em substituição à fluorita em carro torpedo**, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, junho de 2012. <Disponível em: <https://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1532M.PDF>> Acesso: 27 de julho de 2017.

SOCHAN Jung; MARIKA Santagata, **Expansive Behavior Of Coal Mine Spoils Treated With Calcium-Based Stacbilizers**, School of Civil Engineering, Purdue University, Engineering Geology, West Lafayette, IN 47907, USA, 2014.

VIEIRA, Júlia Paulo, **Interacção Cimento Super-plastificante - Avaliação da estabilidade do comportamento**, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2010. <Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142133154/disserta%C3%A7ao-julia%20vieira.pdf>>, Acesso: 10 de Fevereiro de 2016.

ZHANGA, Mo, *et al*, **Calcium-free Geopolymer as a Stabilizer for Sulfate-rich Soils**, Department of Civil and Environmental Engineering, Worcester Polytechnic Institute, Applied Clay Science, Worcester, United States 2015.